



Analyse de la traficabilité en zone tropicale par imagerie spatiale optique et radar : application au Tchad méridional

Raphaël Kourdian

► To cite this version:

Raphaël Kourdian. Analyse de la traficabilité en zone tropicale par imagerie spatiale optique et radar : application au Tchad méridional. Hydrologie. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2009. Français. NNT : . pastel-00563246

HAL Id: pastel-00563246

<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00563246>

Submitted on 4 Feb 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



ED n°398 – Géosciences et Ressources Naturelles, Paris

N° attribué par la bibliothèque

____/____/____/____/____/____/____/____/____/____

T H E S E

pour obtenir le grade de
Docteur de l'Ecole des Mines de Paris
Spécialité “Hydrologie et Hydrogéologie Quantitatives”

présentée et soutenue publiquement par
Raphaël KOURDIAN

le 14 décembre 2009

<p>ANALYSE DE LA TRAFICABILITE EN ZONE TROPICALE PAR IMAGERIE SPATIALE OPTIQUE ET RADAR. APPLICATION AU TCHAD MERIDIONAL</p>

Directeur de thèse : M. Roger COJEAN

Jury

M. Emmanuel LEDOUX
M. Jean-Paul RUDANT
M. Gilles GRANDJEAN
M. Jean-Marie MONGET
M. Thierry ROUSSELIN

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur

La connaissance des conditions de déplacement terrestre dans les pays tropicaux est un besoin clé, en particulier en saison des pluies. Ce travail propose une méthodologie de production de diagnostics de traficabilité et de leur restitution cartographique associée, à partir de l'exploitation de données de télédétection spatiale optique et radar, et de données de sources ouvertes. La démarche a été appliquée à plusieurs environnements du Tchad méridional.

A l'échelle régionale, une classification dynamique des obstacles, types de sols et végétation est réalisée à partir d'imagerie Landsat et MODIS et de modèles de terrains SRTM. Une estimation spatialisée de la mesure de résistance à la pénétration au cône en est extraite, en fonction de l'humidité et de la densité racinaire, pour chaque classe de sols. Ce résultat est confronté avec les caractéristiques de portance des véhicules pour produire une carte de mobilité. A l'échelle locale, les éléments de l'occupation du sol sont extraits de l'imagerie satellite très haute résolution Quickbird par une combinaison optimisée de classifications SVM et orientée objet. L'humidité du sol est estimée à partir du signal radar du capteur TerraSAR-X. La praticabilité des routes existantes est déterminée en fonction de l'état et du revêtement du réseau routier, et des hauteurs de précipitation quotidiennes.

La structure du modèle permet une actualisation rapide et automatisée de la production de diagnostics, par un partitionnement des processus de traitement. Ainsi, elle tire parti du potentiel de l'ensemble des sources disponibles sur la zone d'intérêt (imagerie, données scientifiques, contributions des acteurs de terrain).

Mots clés : traficabilité, télédétection, radar, humidité, sources ouvertes, Tchad, tropical, TerraSAR-X.

Terrestrial road condition awareness in tropical areas is a key need, specifically in rainy season. This work proposes a methodology for trafficability analysis, and its related cartographic representation, from optical and radar remote sensing as well as open source data. This approach is applied to the Southern Chad environment.

At regional scale, a temporal classification of obstacles, soil types and vegetation is produced from Landsat and MODIS imagery, and topographical SRTM data. A spatial estimation of cone index is computed for each soil class, as a function of root density and soil moisture. This result is compared with vehicle bearing capacity to produce a mobility map. At local scale, landcover features are extracted from very high resolution Quickbird imagery by a selective combination of SVM and oriented object classifications. Soil moisture is derived from radar signal of the TerraSAR-X sensor. Road practicability is assessed depending upon conditions of road surface, and daily rainfall measurements.

The model structure allows a fast and an automatic update of trafficability analysis, through workflows partitioning. Thereby, it takes advantage of the whole data available on a potential study area (imagery, scientific data, field work contributions gathered from the web).

Key Words : trafficability, remote sensing, radar, soil moisture, open sources, Chad, tropical, TerraSAR-X.

Remerciements

L'expression des remerciements se présente toujours, de témoignages d'anciens thésards, comme un redoutable délicat exercice de style, non tant dans le travail syntaxique que dans sa subtilité diplomatique à n'oublier personne.

Je tiens en premier lieu à remercier les membres du jury, qui m'ont fait l'honneur d'examiner, de commenter et de juger ce travail. Je tiens également à adresser des remerciements plus particuliers à mes deux directeurs de thèse, MM Monget et Cojean, pour m'avoir fait partager leur expérience et leur connaissance du terrain.

Ce travail n'aurait pu s'initier ni se construire sans les amis et compères de toujours Mrs Thierry Rousselin et Gilles Lerouge. La complémentarité de leurs savoirs, exigences et tons a permis de maintenir des échanges pertinents, ouverts et constructifs tout au long de ce parcours.

Au cours des 3 ans et des poussières, j'ai eu la chance de travailler dans plusieurs « labos », et ainsi de sociabiliser avec des tas de gens intéressants. Ma première pensée vient évidemment aux plus anciens, mes collègues et camarades de salle de thésards, Cyril et JS (big up les gars). Ma seconde pensée revient naturellement à mes partenaires d'open space, la géo212 team : Alice, Hélène, Nicolas, Karine, Jacques, Pierre-Noël et bien sûr les successives stagiaires, Mahé, Amélie et Florianne. Ma troisième pensée est adressée à toutes les personnes qui m'ont apporté un soutien technique ou plus personnel, Simon Gascoin, Simon Blancher, Lionel Berthet, Tim Love et Eric Wolvovsky de la NOAA ainsi que Matthew Rodell de la NASA, et tous les amis thésards ENSMP ou GRN, Julien Frachon, Pierre-Yves Descote, Marion Geuffrard, entre autres.

Je tiens également à adresser mes remerciements aux fournisseurs des images, SPOT Image et Infoterra sans lesquels la thèse n'aurait pu se construire.

Comment ne pas adresser également une pensée émue aux centaines d'étudiants, côtoyé au cours de ces trois années, à travers plus 600 heures de cours, TD, TP et sorties diverses. Cette expérience pédagogique unique mais exigeante a laissée une trace indélébile, empreinte de fierté, de dévouement et de sagesse.

Enfin, je tiens une pensée affective toute particulière à ma tite fiancée Emilie, et à tous les potos présents dans les hauts et les bas, soutiens exemplaires durant ces trois années, Had, Seb, Manu, Claire, Ernesto, Pooh, Cubix, Popy, Célia et j'en oublie sûrement. Merci aux parents, toujours là quand on a besoin d'eux, désolé de vous avoir donné autant de frayeurs, mais promis, maintenant c'est terminé.

LISTE DES FIGURES	X
LISTE DES TABLES	XV
GLOSSAIRE	XVI
LISTE DES ACRONYMES	XVII
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 LA TRAFICABILITE DANS LES DOMAINES CIVILS ET MILITAIRES : ETAT DE L'ART	5
1.1. Réflexions liminaires sur la traficabilité	8
1.1.1. Comment définir la traficabilité	8
1.1.1.1. Route ou hors route	8
1.1.1.2. Prise en compte du convoyage	9
1.1.2. Critères de caractérisation de la traficabilité	9
1.1.2.1. Evaluation géotechnique de la traficabilité des sols	9
1.1.2.2. Critères de caractérisation de la traficabilité en zone tropicale	10
1.1.2.2.1. Propriétés statiques du terrain	11
1.1.2.2.2. Paramètres évolutifs de terrain	12
1.2. Applications civiles de la traficabilité	14
1.2.1. Travaux sur les zones désertiques ou tropicales	14
1.2.2. Projets forestiers et agricoles en zones boréales	17
1.2.3. Projets dans la gestion des risques en zones tempérées	18
1.3. Traficabilité militaire : concept de renseignement préparatoire au combat	20
1.3.1. Contexte	20
1.3.2. Exemple américain de l'Intelligence Preparation of the Battlefield (IPB)	20
1.3.3. Traficabilité dans le système de l'US Army	21
1.3.4. Conséquences des travaux de traficabilité militaire pour notre étude	22
1.4. Les modèles de traficabilité	23
1.4.1. Modèles militaires de traficabilité	24
1.4.2. Modèles civils de traficabilité	26
1.5. Synthèse du besoin et des contraintes opérationnelles	29
1.5.1. Contraintes liées à la problématique de traficabilité	29
1.5.2. Contraintes de mise en place opérationnelle du modèle	30
1.5.3. Limites et voies de progrès	31

CHAPITRE 2 APPROCHE METHODOLOGIQUE	32
2.1. Présentation des orientations méthodologiques	32
2.2. Structure du modèle d'estimation	34
2.2.1. Sources de données	35
2.2.1.1. Sources globales	36
2.2.1.2. Sources locales	37
2.2.1.2.1. Informations disponibles en sources ouvertes	37
2.2.1.2.2. Imagerie radar à Très Haute Résolution	39
2.2.2. Méthodes de traitement et d'interprétation	40
2.2.2.1. Chaînes de traitements d'image	40
2.2.2.2. Chaîne de traitement des produits d'humidité et de praticabilité	42
2.2.2.3. Constitution d'une base statique et mise à jour dynamique	44
2.2.3. Boucles de validation	45
2.3. Représentation des diagnostics de traficabilité	46
CHAPITRE 3 ETUDE DU SOL DU TCHAD MERIDIONAL ET DE SON ENVIRONNEMENT	47
3.1. Organisation des structures du relief tchadien	48
3.1.1. L'Ouaddaï	49
3.1.2. Le Tchad méridional	49
3.2. Géologie du bassin tchadien	51
3.2.1. Le socle précambrien des régions du Mayo Kebbi, du Guéra et de l'Ouaddaï	51
3.2.2. La couverture sédimentaire	52
3.3. Paramètres climatologiques du Tchad méridional	54
3.3.1. La migration de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT), indicateur de la saison des pluies ?	56
3.3.1.1. Profil troposphérique du front de mousson et zone d'influence au sol	56
3.3.1.2. Critère de délimitation temporel de la saison des pluies	58
3.3.1.3. Variabilité spatiale et temporelle de la saison des pluies	58
3.3.2. Analyse des précipitations	61
3.3.2.1. Précipitations annuelles	62
3.3.2.2. Précipitations mensuelles	63
3.3.2.3. Précipitations journalières	64
3.3.3. 2008, une année climatique normale ?	65
3.4. Caractéristiques pédologiques des sols du Tchad méridional	67
3.4.1. Corrélation des référentiels sur le Tchad méridional	68
3.4.2. Caractéristiques pédologiques des sols du Tchad méridional et profils types.	70
3.5. Paramètres élémentaires et classification géotechnique des sols du Tchad méridional	74
3.5.1. Paramètres élémentaires des sols du Tchad méridional	74
3.5.1.1. Paramètres de la phase solide	75
3.5.1.2. Paramètres de la phase liquide	76
3.5.2. Classification géotechnique des sols	79
3.5.2.1. Analyse granulométrique et texture des sols	79
3.5.2.2. Limites d'Atterberg et activité des argiles	80
3.5.2.3. Résultat de la classification géotechnique des sols du Tchad méridional	82
3.6. Synthèse et perspectives	84

CHAPITRE 4 CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION ET DE L'HUMIDITE DU SOL PAR IMAGERIE MULTISPECTRALE MULTI-ECHELLE ET RESTITUTION DE LA TRAFICABILITE

86

4.1. Extraction de l'occupation du sol thématique à partir des capteurs optiques Moyenne et Basse Résolution 87

4.1.1. Cartographie des sols	88
4.1.1.1. Propriétés spectrales des sols	88
4.1.1.2. Approche méthodologique et préparation des données de référence	89
4.1.1.2.1. Choix des indices	89
4.1.1.2.2. Calibration radiométrique	91
4.1.1.2.3. Contexte géographique de la zone test initiale	91
4.1.1.2.4. Base de référence spatiale pédologique	92
4.1.1.3. Extraction des propriétés physiques des sols par combinaison d'indices spectraux	93
4.1.1.3.1. Indice 5/7	93
4.1.1.3.2. Indice 5/1	95
4.1.1.3.3. Indice 4/3	96
4.1.1.4. Conclusions	97
4.1.1.5. Validation quantitative	98
4.1.2. Végétation	101
4.1.2.1. Propriétés spectrales des végétaux	102
4.1.2.2. Indices de végétation	102
4.1.2.3. Etude phénologique	103
4.1.2.3.1. Calibration des données	103
4.1.2.3.2. Suivi phénologique de la plaine du Logone par le capteur MODIS	104
4.1.2.3.3. Conséquences sur l'estimation de la biomasse et de la densité racinaire	108
4.1.2.4. Les zones arborescentes	110
4.1.2.5. Synthèse des résultats sur la plaine du Logone	111
4.1.2.6. Portée de l'analyse	114
4.1.3. Surfaces bâties	116
4.1.3.1. Démarche	117
4.1.3.2. Composition des ensembles de données	120
4.1.3.3. Résultats	120
4.1.3.4. Conclusions et portée de l'analyse	122
4.1.3.4.1. Synthèse de l'interprétation sur N'Djaména	122
4.1.3.4.2. Portée spatiale	123
4.1.4. Obstacles hydriques	126
4.1.4.1. Introduction	126
4.1.4.2. Propriétés spectrales de l'eau de rivière	128
4.1.4.3. Méthodologie	128
4.1.4.4. Résultats et validation	129
4.1.5. Compilation des éléments thématiques de l'occupation du sol	132

4.2. Extraction de l'occupation du sol à l'échelle métrique à partir d'imagerie Très Haute Résolution 134

4.2.1. Interprétation de l'occupation du sol par imagerie Quickbird : état de l'art et protocole de traitement	135
4.2.1.1. Etat de l'art des techniques opérationnelles d'interprétation de l'occupation du sol par imagerie Quickbird	135
4.2.1.1.1. Techniques non supervisées	136
4.2.1.1.2. Classifications et techniques supervisées	137
4.2.1.2. Protocole de traitement	138
4.2.1.2.1. Phase préliminaire de qualification de l'imagerie Quickbird Google Earth	138
4.2.1.2.2. Phase principale d'interprétation d'occupation du sol	140
4.2.2. Résultats de l'extraction de l'occupation du sol	142
4.2.2.1. Qualification de l'imagerie Quickbird Google Earth	142
4.2.2.1.1. Corrections radiométriques	142
4.2.2.1.2. Qualité d'interprétation	143
4.2.2.1.3. Géométrie	144

4.2.2.1.4.	Optimisation du niveau de zoom	145
4.2.2.1.5.	Conclusion	146
4.2.2.2.	Classification spectrale et analyse sémantique	146
4.2.2.2.1.	Présentation de l'image de référence	147
4.2.2.2.2.	Influence de l'échantillonnage sur l'interprétation	148
4.2.2.2.3.	Qualité des classifications et coefficient d'erreur sémantique	150
4.2.2.2.4.	Seuil de reconnaissance géométrique	152
4.2.2.2.5.	Optimisation des classifications par combinaison sélectives	154
4.2.2.3.	Synthèse et portée de l'analyse	155
4.3.	Cartographie de l'humidité du sol et des pistes par imagerie radar Très Haute Résolution en bande X	157
4.3.1.	Apport des capteurs d'imagerie radar THR en bande X	157
4.3.1.1.	Caractéristiques des imageurs SAR en bande X	157
4.3.1.1.1.	Principe du traitement SAR	157
4.3.1.1.2.	Spécificité des capteurs spatiaux en bande X, TerraSAR-X et Cosmo-Skymed	158
4.3.1.2.	Influence des paramètres instrumentaux et du milieu sur l'image THR en bande X	159
4.3.1.2.1.	Paramètres instrumentaux	160
4.3.1.2.2.	Paramètres de surface	161
4.3.1.3.	Acquisition des images	163
4.3.2.	Estimation de l'humidité des pistes et des sols	165
4.3.2.1.	Prétraitements radiométriques des images THR radar	165
4.3.2.1.1.	Réduction du speckle	165
4.3.2.1.2.	Calibration radiométrique	169
4.3.2.2.	Interprétation des images radar THR	171
4.3.2.2.1.	Préparation des données d'interprétation	171
4.3.2.2.2.	Comportement du signal en fonction de l'humidité des sols	174
4.3.2.3.	Comportement du signal en fonction de l'humidité des pistes	177
4.3.2.4.	Conclusions	181
4.4.	Restitution cartographique de la traficabilité	182
4.4.1.	Intégration du réseau routier à la cartographie de traficabilité	182
4.4.1.1.	Caractéristiques du réseau routier du Tchad méridional	182
4.4.1.1.1.	Nomenclature de hiérarchisation et de représentation du réseau	182
4.4.1.1.2.	Géométrie et état du réseau routier au Tchad méridional	183
4.4.1.2.	Indice de praticabilité et intégration du réseau routier à la cartographie de traficabilité	185
4.4.1.2.1.	Indice de praticabilité et cartographie de traficabilité à l'échelle régionale	185
4.4.1.2.2.	Intégration du réseau routier à la cartographie de traficabilité à l'échelle locale	187
4.4.2.	Cartes de traficabilité	188
4.4.2.1.	Restitution cartographique de l'humidité du sol	188
4.4.2.1.1.	Humidité du sol à l'échelle régionale	188
4.4.2.1.2.	Humidité du sol à l'échelle locale	190
4.4.2.2.	Restitution cartographique de la traficabilité	190
4.4.2.2.1.	Expression géomécanique des surfaces tout-terrain par la valeur de résistance à la pénétration au cône	190
4.4.2.2.2.	Intégration de la densité racinaire pour la mesure de traficabilité	192
4.4.2.3.	Conclusions	194
4.5.	Synthèse	203
CHAPITRE 5	SYNTHESE DE LA RECHERCHE ET PERSPECTIVES	204
5.1.	Synthèse	205
5.1.1.	Résumé des atouts du modèle	205
5.1.1.1.	Orientations méthodologiques	205
5.1.1.1.1.	Restitution multi-échelle	205
5.1.1.1.2.	Mise à jour et formulation des diagnostics	205
5.1.1.2.	Apport des données en sources ouvertes pour le développement méthodologique	207

5.1.1.3.	Apport des données radar THR	208
5.1.2.	Faiblesses et limites du modèle	208
5.1.2.1.	Fiabilité des sources d'imagerie Landsat et Quickbird	209
5.1.2.1.1.	Risques associés à l'utilisation des images d'archive Landsat	209
5.1.2.1.2.	Risques associés à l'utilisation de l'imagerie Quickbird Google Earth	210
5.1.2.2.	Fiabilité des sources ouvertes documentaires	210
5.1.2.2.1.	Risques sur l'utilisation de cartographie pédologique d'archive	210
5.1.2.2.2.	Evaluation de la fiabilité des sources ouvertes	211
5.1.2.3.	Schéma décisionnel	212
5.1.3.	Voies d'amélioration	214
5.1.3.1.	Estimation du délai de production	214
5.1.3.2.	Evolution des sources d'acquisitions	216
5.2.	Portée du développement méthodologique	218
5.2.1.	Présentation de la zone test	218
5.2.2.	Démarche	219
5.2.3.	Résultats	220
5.3.	Perspectives	223
CONCLUSIONS GENERALES		225
ANNEXE 1 DESCRIPTION PEDOGENETIQUE DES SOLS DU TCHAD MERIDIONAL ET PROFILS TYPES		227
ANNEXE 2 CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES CAPTEURS SATELLITAIRES UTILISES		232
BIBLIOGRAPHIE		237

Liste des figures

Figure 1 : Plan de la Bataille d'Austerlitz, qui opposa les forces de Napoléon 1er à celles du Tsar Alexandre 1er, en 1805 (Atlas of U. S. Military Academy)	6
Figure 2 : Exemples de pénétromètres utilisés pour l'étude du comportement mécanique des sols	10
Figure 3 : Liste des paramètres d'estimation de la traficabilité	11
Figure 4 : Image d'amplitude (en haut) et de vitesse (en bas) du radarALOS, avec la représentation du trajet optimum, d'après Baghdadi, et al., 2004.	15
Figure 5 : Exemple de production de UNJLC sur le Sud Darfour (source reliefweb.int)	16
Figure 6 : Exemple de nouveaux engins développés pour réduire les impacts de l'exploitation forestière.	17
Figure 7 : Boucle OODA utilisée dans les systèmes d'information des armées occidentales	20
Figure 8 : Procédure américaine, « Intelligence Preparation of the Battlefield », d'après le Field Manual 34-130 (US Army Fiels Manual, 1991)	21
Figure 9 : L'IPB automatisé tel que modélisé par le Stanford Research Institute (SRI)	24
Figure 10 : Les principes des techniques de superposition de facteurs complexes (CFO) et d'obstacles combinés (COO), d'après Donlon et Forbus (1999), modifié.	26
Figure 11 : Schéma décisionnel du modèle de traficabilité de Suvinen et al., 2002	27
Figure 12 : Modèle de traficabilité tout-terrain, développé par Gumos, 2005	28
Figure 13 : Exemple de franchissement rendu possible par l'habileté du chauffeur.	29
Figure 14 : Représentation schématique du modèle d'estimation de traficabilité	35
Figure 15 : Enregistrements des volumes et de la densité de nuages par le satellite TRMM	36
Figure 16 : Typologie des sources ouvertes en lignes utilisée dans le modèle d'estimation de traficabilité	38
Figure 17 : Chaîne de traitement de l'imagerie multispectrale Landsat et MODIS	41
Figure 18 : Chaîne de traitement de l'imagerie Quickbird	41
Figure 19 : Chaîne de traitement d'image radar mise au point dans l'étude.	42
Figure 20 : Chaîne de traitement des produits d'humidité GLDAS	43
Figure 21 : Chaîne de traitement des produits de précipitation TRMM	44
Figure 22 : Relief général du bassin tchadien et principaux cours d'eau	48
Figure 23 : Axe Abéché-N'Djaména, donnant sur les inselbergs de l'Ouaddaï	49
Figure 24 : Sommet de Koro à l'approche du village de Moussedan, et localisation sur imagerie IKONOS	50
Figure 25 : Carte géologique simplifiée des formations anté-oligocènes, à partir des travaux de Pias (1967), Louis (1970) et Riser(1999).	51
Figure 26 : Répartition des zones climatiques du Tchad et évolution des isohyètes de précipitations	55
Figure 27 : Coupe transversale schématique en août de la troposphère au-dessus de l'Afrique vers le méridien origine, (Flohn, 1965)	57
Figure 28 : Observation de la ZCIT par imagerie MODIS, au 12 octobre 2008	57
Figure 29 : Etendue de la variabilité des dates de début de saison des pluies de 1998 à 2008, pour 5 localités du Tchad méridional, réparties selon leur latitude	59
Figure 30 : Etendue de la variabilité des dates de fin de saison des pluies de 1998 à 2008, pour 5 localités du Tchad méridional, réparties selon leur latitude	59
Figure 31 : Corrélation entre la durée de la saison des pluies et la durée de la présence du front de mousson au nord de N'Djamena.	60
Figure 32 : Corrélation entre la date de démarrage du début des pluies et sa durée, de 1997 à 2008, pour 5 localités du Tchad méridional	61
Figure 33 : Corrélation entre les relevés de précipitations d'Olivry et al. (1996) et les estimations surfacique de précipitations des données du projet GPCP (en mm cumulé).	62
Figure 34 : Diagramme des précipitations annuelles sur N'Djamena de 1932 à 2007, à partir des relevés de Mahé (1993), Olivry et al. (1996) et des estimations satellitaires (les années déficitaires apparaissent en orange)	63
Figure 35 : Distribution des précipitations mensuelles moyennes, pour 5 localités du Tchad méridional, à partir des données du satellite TRMM, pour la période 1998-2008.	64
Figure 36 : Précipitations journalières des averses précoces pour cinq localités du Tchad méridional, de 1998 à 2008 (Données du satellite TRMM)	65
Figure 37 : Corrélation entre la latitude du lieu des averses précoces et la période temps le séparant de l'arrivée du flux de mousson, pour cinq localités du Tchad méridional (Données du satellite TRMM)	65
Figure 38 : Carte de répartition des précipitations cumulées pour l'année 2008, estimées par le capteur satellitaire TRMM.	66

Figure 39 : Carte pédologique simplifiée des sols du Tchad méridional, synthétisée à partir des données de la F.A.O.(FAO, 1971-1981; Nachtergaele et al., 2008)	68
Figure 40 : Répartition des cartes pédologiques du Tchad méridional	70
Figure 41 : Représentation schématique de la constitution d'un volume de sol	74
Figure 42 : Distribution du poids volumique apparent en fonction du rapport de la fraction argileuse sur la fraction sableuse, pour l'horizon superficiel des sols du Tchad méridional	75
Figure 43 : Comparaison de l'humidité du sol, pour l'horizon superficiel, entre les valeurs brutes du capteur AMSR-E et corrigées par le modèle d'assimilation GLDAS (l'indice 100 % représente la teneur estimée par GLDAS).	77
Figure 44 : Evolution de la teneur en eau pondérale moyenne de l'horizon superficiel de septembre 2007 à septembre 2008.	78
Figure 45 : Courbes granulométriques des échantillons de sol de l'horizon 0-40 cm appartenant à la classe des sols grenus sableux (classification LPC).	79
Figure 46 : Plasticité des sols fins du Tchad méridional (classification LPC)	81
Figure 47 : Indice de plasticité de l'horizon superficiel des sols du Tchad méridional, en fonction de la fraction argileuse.	81
Figure 48 : Distribution pondérée des classes LPC de l'horizon superficiel des sols du Tchad méridional	82
Figure 49 : Répartition des classes LPC des sols en fonction de leur appartenance pédologique	83
Figure 50 : Cartes des risques potentiels de praticabilité du Tchad méridional pour les mois de janvier, mars, juin et septembre 2008 établies à partir de la classe géotechniques du sol et sa teneur en eau pondérale .	85
Figure 51 : Bandes d'absorption des capteurs Landsat ETM+, MODIS et ASTER, d'après Kääb et al. (2002), modifié	88
Figure 52 : Courbes spectrales types des réflectances des composants des sols du Tchad méridional, dans le domaine optique	90
Figure 53 : Composition en vraies couleurs de l'image Landsat ETM+ du 28 Septembre 2001	92
Figure 54 : Répartition des valeurs moyennes des proportions en sable, synthétisées à partir des cartes pédologiques régionales.	93
Figure 55 : Corrélation entre les valeurs de l'indice 5/7 et les teneurs en sable	94
Figure 56 : Corrélation entre les valeurs de l'indice 5/7 et les teneurs en argile et argile+ silt	94
Figure 57 : Répartition spatiale des teneurs en sable, calculées à partir de l'indice 5/7, classées par déciles	95
Figure 58 : Corrélation entre les teneurs en kaolinite et les valeurs de l'indice 5/1	96
Figure 59 : Répartition spatiale des teneurs en kaolinite calculées à partir de l'indice 5/1.	96
Figure 60 : Distribution des valeurs de l'indice 4/3 par type de sols	97
Figure 61 : Cartographie des sols selon la classification LPC/USCS	98
Figure 62 : Somme des estimations des proportions en sable, silt et argile	99
Figure 63 : Corrélation entre les estimations de la teneur en sable et les valeurs de référence	100
Figure 64 : Estimation de la teneur absolue en sable sur 4 images Landsat	101
Figure 65 : Calibration des indices de végétation EVI et NDVI du capteur MODIS par le capteur ETM+, sur la zone d'étude.	104
Figure 66 : Evolution de l'indice EVI sur l'année 2008, par type de couvert végétal	105
Figure 67 : Evolution de l'indice NDVI sur l'année 2008 par type de couvert végétal	105
Figure 68 : Plantations de l'espèce taro <i>Xanthosoma sagittifolium</i> cultivée dans la plaine du Logone	106
Figure 69 : Localisation des points de mesures des indices de végétation, sélectionnés pour les différents biomes de la plaine du Logone	107
Figure 70 : Exemple de marigot recouvert en partie par des nénuphars, Nord N'Djaména	108
Figure 71 : Evolution annuelle de la densité racinaire des zones herbeuses de la plaine du Logone, pour les indices NDVI et EVI	110
Figure 72 : Evolution de la surface boisée entre 2001 et 2005. Produits du capteur MODIS Vegetation Continous Field (MOD44B).	112
Figure 73 : Caractérisation de la végétation pour la traficabilité (obstacles et densité racinaire) aux dates du 6 avril 2008 (haut), 28 août 2008 (centre) et 31 octobre 2008 (bas)	113
Figure 74 : Développement de la végétation sur une des pistes orientales d'Adré, au 18 juillet 2008 (source FlickrR, photo © Mia Farrow)	114
Figure 75 : Zone marécageuse du parc de Zakouma, Salamat, datée du 26 octobre 2008 (source FlickrR, photo de Jeff Hudgens pour CNN international)	115
Figure 76 : Valeurs d'indices EVI pour quatre paysages des régions de l'Ouaddaï et du Salamat	115
Figure 77 : Caractérisation de la végétation pour la traficabilité (obstacles et densité racinaire) aux dates du 6 avril 2008 (gauche) et du 28 août 2008 (droite)	116
Figure 78 : Filtre laplacien de la 5 ^e composante de l'ACP de l'image Landsat de 2003 (à gauche) et de 2001 (à droite)	118

Figure 79 : Compositions colorées des canaux 321 extraits des images Landsat du 21 octobre 2001 (en haut) et 12 Janvier 2003 (en bas), centrées sur N'Djaména.	119
Figure 80 : Rapport des superficies de référence sur les superficies classées pour l'image Landsat d'octobre 2001	121
Figure 81 : Rapport des superficies de référence sur les superficies classées pour l'image Landsat de janvier 2003	121
Figure 82 : Résultats des classifications orientées objet (à gauche) et maximum de vraisemblance (à droite), de l'image de janvier 2003, centrée sur N'Djaména	122
Figure 83 : Résultat de la classification par maximum de vraisemblance de l'image Landsat d'octobre 2001 sur N'Djaména.	123
Figure 84 : Identification des villes d'Adré (en haut) et Al-Junaynah (en bas) dans l'Ouaddaï, par maximum de vraisemblance, seuillée à 98%.	124
Figure 85 : Identification de la ville de Bousso et des villes rurales avoisinantes (rives du Chari) par imagerie Landsat 7 ETM+	125
Figure 86 : Vue du fleuve Logone à Laï, par imagerie Quickbird, datée du 11 septembre 2006	126
Figure 87 : Répartition des cours d'eau pérennes et intermittents, affluents du Chari.	127
Figure 88 : Profils spectraux expérimentaux de l'eau claire et de l'eau turbide, et des rivières Chari et Logone	128
Figure 89 : Distribution des valeurs d'indice 4/3 pour trois groupes d'occupation du sol.	130
Figure 90 : Détail de l'extraction des barrières hydriques sur la région de Laï, à la confluence du Logone et du Tandjilé par indice 4/3 seuillé	130
Figure 91 : Détail de l'extraction des barrières hydriques sur la région de Doba, à la confluence du Logone et de la Pendé	131
Figure 92 : Affluents mineurs de la Pendé à Doba sur image Quickbird du 22 décembre 2005.	132
Figure 93 : Occupation du sol thématique, réalisée à partir des images MODIS du 10 avril et 2 août 2008 et du capteur Landsat 7 ETM+ du 26 septembre 2001, centrées sur Laï.	133
Figure 94 : Buse en béton d'évacuation des eaux de pluies, N'Djaména	134
Figure 95 : Localisation des extraits Quickbirds extraits de Google Earth superposé sur l'image Quickbird source	139
Figure 96 : Protocole de qualification de l'imagerie Quickbird issue du globe virtuel Google Earth	140
Figure 97 : Protocole d'évaluation des méthodes de classification à base pixel, selon un échantillonnage aléatoire, pour l'interprétation de l'occupation du sol	141
Figure 98 : Protocole de qualification de méthodes à base pixel et orientée objet selon deux critères d'estimation, et évaluation de l'efficacité de leur combinaison sélective	141
Figure 99 : Protocole de validation de la méthode évaluée par les deux étapes précédentes par son report sur sept types d'environnements du Tchad méridional	142
Figure 100 : Superposition d'un extrait d'image Google Earth sur l'image de référence, après correction d'étirement.	142
Figure 101 : Image Quickbird après conversion et rétro-conversion RVB - TSV (S+0,1) – RVB, à gauche, et son homologue diffusé sur Google Earth, à droite	143
Figure 102 : Valeurs des diagonales des matrices de confusion des interprétations d'occupation du sol pour 5 extraits d'images issus de Google Earth, et pour 5 types d'algorithmes de classification.	144
Figure 103 : Ecart types des superficies moyennes des résultats de classifications SVM et orientée objet, pour 5 échantillons	145
Figure 104 : Prise de vue Quickbird du secteur périurbain nord de N'Djaména, extrait Google Earth 4 accessible en mars 2007	147
Figure 105 : Résultats des tests d'échantillonnage automatique pour 5 méthodes de classifications supervisées	149
Figure 106 : Variance du coefficient Kappa après 10 tests d'apprentissage	149
Figure 107 : Estimation de la qualité des classifications SVM et orientée objet à partir des diagonales des matrices de confusion	150
Figure 108 : Classification ascendante hiérarchique de la matrice de distance sémantique entre les classes d'objets, représentée par un dendrogramme	151
Figure 109 : Valeur du coefficient sémantique SI pour chaque classes, selon les classifications SVM et orientée objet	152
Figure 110 : Conditions de sélection de l'algorithme face à des situations topologiques rencontrées entre deux couches vecteur.	153
Figure 111 : Taux de reconnaissance des objets, classés par dimension, exprimé en nombre de pixels, pour les deux méthodes de classification employées	153

Figure 112 : Résultat des quatre interprétations d'occupation du sol réalisées sur l'extrait d'image Quickbird issue de Google Earth : photo-interprétation, classifications SVM et orientée objet et optimisation	154
Figure 113 : Interprétation de la zone ouest de Lai par combinaison selective des méthodes SVM et Orientée objet	155
Figure 114 : Principe de fonctionnement d'un capteur radar SAR	158
Figure 115 : Modes d'acquisition et caractéristiques orbitales des images issues des capteurs TerraSAR-X (en haut) et Cosmo-Skymed (en bas)	159
Figure 116 : Bandes de fréquences micro-ondes utilisées par l'imagerie radar satellitaire	160
Figure 117 : Mécanismes de rétrodiffusion et profondeur de pénétration de l'onde radar X dans le sol	161
Figure 118 : Comportement du signal radar en fonction de la rugosité de surface	162
Figure 119 : Localisation des images radar programmées	164
Figure 120 : Résolution de l'image d'amplitude selon le mode d'acquisition du capteur TerraSAR-X	164
Figure 121 : Variance du lac d'Adré en fonction de la taille de la fenêtre, pour 6 filtres adaptatifs	167
Figure 122 : Variances de la zone du lac d'Adré après filtrage adaptatif, pour les capteurs Cosmo-Skymed et TerraSAR-X	167
Figure 123 : Distribution des valeurs de speckle sur le lac d'Adré avant calibration, puis filtrée.	168
Figure 124 : Géométrie de codage du signal en brillance (Beta nought) et coefficient de rétrodiffusion (sigma nought)	169
Figure 125 : Configuration d'estimation du bruit sur le mode stripmap du capteur TerraSAR-X	170
Figure 126 : Contribution du bruit à six périodes de temps en azimuth (valeurs réelles) sur l'image TerraSAR-X d'Adré du 14 mars 2008	170
Figure 127 : Composition colorée de l'image double polarisation HH-VV de Salamat, avant et après segmentation	172
Figure 128 : Composition colorée des images de saison sèche et humide d'Adré, avant et après le processus de segmentation	173
Figure 129 : Evolution du paysage dans la région d'Adré, entre la fin de saison sèche (6 juin 2005) et la fin de saison des pluies (5 septembre 2005), observé sur imagerie Quickbird	174
Figure 130 : Coefficients de rétrodiffusion des sols de la région d'Adré, extrait des images TerraSAR-X du 14 mars et du 6 septembre 2008.	175
Figure 131 : Coefficients de rétrodiffusion en polarisation HH et VV des différents secteurs de l'image de Salamat.	176
Figure 132 : Extrait du réseau de routes sur imagerie optique et radar THR	178
Figure 133 : Profils types de coefficients de rétrodiffusion des routes, extraits des images de Lai et Abéché	178
Figure 134 : Extrait du réseau de pistes sur imagerie optique et radar THR	179
Figure 135 : Profils types de coefficients de rétrodiffusion des pistes, extraits des images de Lai et Abéché	179
Figure 136 : Extrait du réseau de sentiers sur imagerie optique et radar THR	180
Figure 137 : Profils types de coefficients de rétrodiffusion des sentiers, extraits des images de Lai et Abéché	180
Figure 138 : Nomenclature du réseau routier, exemples de cas rencontrés au Tchad méridional	183
Figure 139 : Exemples de prévision des risques liés à la dégradation des voies par les intempéries (par équipement des voies ou via des interdictions de circulation)	184
Figure 140 : Arbre de décision de l'indice de praticabilité	186
Figure 141 : Extrait de la praticabilité des routes pour le 1er octobre 2008 sur la région de Lai	186
Figure 142 : Détection des pistes et sentiers sur la région de Bol (Mayo Kebbi)	187
Figure 143 : Détection du revêtement d'une route à la sortie est de Massaguet	188
Figure 144 : Extrait de l'estimation de l'humidité sur la plaine d'inondation du Logone, au nord de Lai, au 11 octobre, à 18h.	189
Figure 145 : Extrait de la superposition sélective des données d'occupation du sol extrait de l'imagerie Quickbird (en haut) et de l'humidité issues de l'imagerie THR radar (en bas)	190
Figure 146 : Abaques de valeurs de résistance à la pénétration au cône, en fonction de la teneur en eau pondérale	192
Figure 147 : Corrélation entre Cohésion du sol et valeur de résistance à la pénétration au cône, pour les sols argileux et argilo-limoneux, pour différentes classes d'humidité.	193
Figure 148 : Restitution cartographique de la résistance à la pénétration au cône induite par la densité racinaire, au 2 août 2008.	194
Figure 149 : Extrait de la carte de traficabilité pour le 2 août 2008, 18h, pour un véhicule exerçant une pression de 1082 kPa (camion de tonnage moyen)	195
Figure 150 : Restitution cartographique de la résistance du sol, de la praticabilité des routes et des obstacles, pour la région d'Adré, au 6 septembre 2008	196

Figure 151 : Extrait de la carte de traficabilité du 6 septembre, pour un véhicule exerçant une charge de 1082 kPa, région d'Adré	197
Figure 152 : Carte de résistance à la pénétration au sol et obstacles, région orientale du Salamat, au 5 septembre 2008	198
Figure 153 : Diagnostic de traficabilité, région orientale du Salamat, au 5 septembre 2008, pour un véhicule de transport de troupes (VCI=1082 kPa)	199
Figure 154 : Image Quickbird issue de Google Earth, zone orientale du Salamat	200
Figure 155 : Carte de résistance à la pénétration au cône, à l'échelle locale, zone orientale du Salamat	201
Figure 156 : Diagnostic de traficabilité tout-terrain pour un camion de tonnage moyen (1082 kPa), au 5 septembre 2008	202
Figure 157: Evolution saisonnière des valeurs de résistance à la pénétration au cône, au 2 mars (à gauche) et 6 septembre 2008 (à droite), région d'Adré.	206
Figure 158 : Diagnostics de traficabilité pour un véhicule léger 4x4 (au centre) et pour un camion de tonnage moyen (à droite), comparé à une composition colorée Quickbird, Adré	207
Figure 159 : Comparaison du site pétrolier de Mboki sur imagerie Landsat du 26 novembre 1999 (à gauche) et sur imagerie Quickbird du 24 novembre 2006.	209
Figure 160 : Evolution du nord de l'agglomération de N'Djaména observée par les mises à jour successives de l'imagerie Quickbird issue de Google Earth	210
Figure 161 : Schéma décisionnel du modèle de traficabilité, selon la disponibilité des sources	213
Figure 162 : Evaluation moyenne du temps de calcul (en heure) des traitements d'images pour l'extraction de l'occupation du sol (colonnes de gauche) et pour l'humidité du sol (colonne du milieu)	215
Figure 163 : Temps de production (en heure) du modèle de traficabilité	215
Figure 164 : Comparaison du temps de production (en heure) d'une analyse complète, et de sa mise à jour	216
Figure 165 : Couverture THR du Tchad méridional disponible sur Google Earth depuis 4 ans	217
Figure 166 : Carte de la région des Monts Malimba, Katanga	219
Figure 167 : Carte de praticabilité du sol et des pistes, à l'échelle régionale, de la région des Monts Malimba, au 3 juillet 2008	221
Figure 168 : Andropogonées (<i>Andropogon gerardii</i>) recouvrant un planosol en fin de saison des pluies	231
Figure 169 : Illustration et mécanisme de formation des microreliefs gilgai (Verger, 1994)	231

Liste des Tableaux

<i>Tableau 1 : Liste des projets et services globaux thématiques, en rapport avec la problématique de traficabilité</i>	39
<i>Tableau 2 : : Correspondances entre les classifications Aubert (1965) et WRB (FAO, 1996) et propriétés texturales moyennes des sols du Tchad méridional</i>	69
<i>Tableau 3 : Coefficients de correction radiométrique appliqués à l'image Landsat ETM+ de la plaine du Logone (d'après Markham et al., 1997).</i>	91
<i>Tableau 4 : Seuils de discrimination des valeurs d'humidité (indice 4/3 transformé), de teneur en kaolinite (indice 5/1 transformé) et de proportion en sable (indice 5/7 transformé).</i>	97
<i>Tableau 5 : Attribution des combinaisons d'indices aux classes pédologiques et correspondances avec la classification LPC/USCS.</i>	98
<i>Tableau 6 : Coefficients des droites de corrélation entre densité de biomasse végétale et indices de végétation NDVI et EVI, pour les surfaces herbeuses de la plaine du Logone.</i>	109
<i>Tableau 7 : Composition des ensembles de données de classification.</i>	120
<i>Tableau 8 : Calcul de la Divergence Transformée entre deux groupes d'échantillons pour 9 combinaisons spectrales</i>	129
<i>Tableau 9 : Caractéristique des différents écrans par rapport à la longueur de la barre d'échelle de l'outil Google Earth.</i>	146
<i>Tableau 10 : Valeurs des diagonales des matrices de confusion pour des échantillons d'images extraites à 5 niveaux de zoom</i>	146
<i>Tableau 11 : Matrice de distance de l'indice sémantique de traficabilité</i>	151
<i>Tableau 12 : Caractéristiques des images radar utilisées pour l'étude.</i>	165
<i>Tableau 13 : Composition moyenne des sols de la région d'Adré, en argile, limon et sable.</i>	175
<i>Tableau 14 : Composition moyenne des sols de la région de Salamat, en argile, limon et sable</i>	175
<i>Tableau 15 : Coefficients C1 et C2 pour les différentes classes de sols LPC/USCS.</i>	191

Bande spectrale : Intervalle du spectre des longueurs d'ondes (ou de fréquences) du rayonnement électromagnétique. De nombreux capteurs numériques utilisés en télédétection permettent de réaliser simultanément des images d'un même site dans plusieurs bandes spectrales.

Biomasse (définition écologique) : masse totale des organismes vivants mesurée dans une population, une aire ou une autre unité.

Biome : ensemble d'écosystèmes caractéristique d'une aire biogéographique. Le biome est nommé en fonction des espèces végétales et animales qui y prédominent.

Capteur : un capteur est un dispositif transformant l'état d'une grandeur physique observée en grandeur utilisable. Sur un satellite, le capteur enregistre l'énergie électromagnétique, émise ou réfléchi et la convertit en charge électrique.

Classification (d'image) : Méthode d'analyse des données qui permet de ranger des objets (pixels ou entités géographiques quelconques) dans des classes.

Commission (erreur d') : dans une matrice de confusion, pixels incorrectement inclus dans la classe représentée par la colonne.

Dynamique (estimation) : résultat qui n'est pas figé dans le temps mais mis à jour régulièrement par des processus spécifiques et dont il souligne le caractère évolutif. Il s'oppose à statique.

Diagnostic : Jugement porté sur une situation, sur un état.

Géotechnique : Discipline scientifique et technique traitant des propriétés pétrophysiques et mécaniques des sols

Glacis : surface légèrement inclinée de zone de piedmonts

Globe virtuel : logiciel qui modélise la Terre ou toute autre planète en 3D, dont il permet une visualisation par un assemblage d'images satellitaires et une modélisation du relief.

Inselberg : colline ou montagne isolée formée par une érosion différentielle d'une roche plus résistante. C'est une forme de relief typique des régions tropicales.

Maille : résolution d'une grille de points ou de pixels.

Mashup cartographique : application composite qui utilise et croise le contenu de sources tierces pour proposer un service hybride et une expérience intégrée. Un mashup cartographique consiste donc à agréger du contenu sur une interface cartographique provenant d'un service externe.

Occupation du sol : couverture (bio) physique de la surface des terres émergées.

Omission (erreur d') : dans une matrice de confusion, pixels incorrectement attribués à des classes autre que celle représentée par la rangée.

Pédologie : Science des sols. L'évolution pédologique des sols dépend des conditions bioclimatiques, de la nature de la roche mère et des conditions de stations du sol (humidité et morphologie). Les profils pédologiques des sols étudiés sont présentés en annexe 1.

Phénologie (végétale) : étude de l'apparition d'événement périodique déterminée par les variations saisonnières du climat.

Spatialisation : processus d'organisation d'une mesure prise localement en une grille de points.

Liste des acronymes

AISS : Association Internationale de la Science du Sol

ALMIP : AMMA Land surface Model Intercomparison Project

ALOS : Advanced Land Observing Satellite

AMMA : African Monsoon Multidisciplinary Analysis

AMSR-E : Advanced Microwave Scanning Radiometer

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CCTT : Close Combat Tactical Trainer

CFO : Complex Factor Overlay

CI : Cone index, équivalent du terme de « résistance à la pénétration au cône »

COO : Combined Obstacle Overlay

CTI : Compound Topographic Index

DECART : Dispositif Expérimental de CARactérisation de la Traficabilité

DTSS : Digital Topographic Support System

ECORS : Etude de Caractérisation Opérationnelle des Routes et des Sols

ECOWOOD : Ecoefficient Wood Harvesting on Sensitive Sites

EOS : Earth Observation Satellite

ETM : Enhanced Thematic Mapper

EVI : Enhanced Vegetation Index

FAO : Food and Agricultural Organization

FM : Field Manual

GDASC : Global Disaster Alert and Coordination System

GLDAS : Global Land Data Assimilation System

GMES : Global Monitoring for Environment and Security

GMOSS : Global Monitoring for Security and Stability

GOES : Geostationary Operational Environmental Satellites

GPCP : Global Precipitation Climatology Project

HWSM : Harmonized World Soil Map

IMETS : Integrated Meteorological System

IPB : Intelligence Preparation of the Battlefield

ISSS : International Society of Soil Science

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

LDCM : Landsat Data Continuity Mission

LPC : Laboratoire des Ponts et Chaussées

LSM : Land Surface Model

MATS : Matériel d'Amélioration de la Traficabilité des Sols

MCOO : Modified Combined Obstacle Overlay

MODIS : MODerate resolution Imaging Spectrometer

ModSAF : Modular Semi-Automated Forces

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MSG : MeteoSat Second Generation

NASA : National Aeronautics and Space Administration

NDVI : Normalized Vegetation Index

NRMM : NATO Reference Mobility Model

NOAA AVHRR : National Oceanic and Atmospheric Administration Advanced Very High Resolution Radiometer

NOAH : acronyme des 4 groupes institutionnels qui ont participé à la création du Land Surface Model :

National Centers for Environmental Prediction (NCEP)

Oregon State University (Dept of Atmospheric Sciences)

Air Force (instituts AFWA & AFRL)

Hydrologic Research Lab - NWS (devenu Office of Hydrologic Dev -- OHD)

OCHA : Office for the Coordination of Humanitarian Affairs

OCOKA : Observation, Cover and Concealment, Obstacles, Key Terrain, Avenues of Approach

ONG : Organisation Non Gouvernementale

OneSAF : One Semi-Automated Forces

OODA : Observation – Orientation – Décision – Action

PEA : Programme d'Etude Amont

RADAR : RADio Detection And Ranging

RCA : République Centrafricaine

SETRA : Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes

SERVIR : Servir (en espagnol)

SIG : Système d'Information Géographique

SRTM : Shuttle Radar Topographic Mission

TDA : Tactical Decision Aid

THR : Très Haute Résolution

TRMM : Tropical Rainfall Measurement Mission

TWI : Topographic Wetness Index

UNEP : United Nations Environment Program

UNJLC : United Nations Joint Logistics Center

USCS : Unesco Soil Classification System

USGS : United States Geological Survey

WARSIM : Warfighters' Simulation

WES : USA Corps of Engineer Waterways Experimental Station

WIST : Warehouse Inventory Search Tool

WRB : World Reference Base for Soil Resources

ZCIT : Zone de Convergence InterTropicale

Introduction générale

Les milieux naturels africains se marquent par le caractère difficilement accessible par voie terrestre de certains secteurs géographiques : déserts, forêts denses, régions à fort relief, champs de pierres, oueds torrentiels, inondation des plaines alluviales,... Cet environnement crée des difficultés à se déplacer. Le climat à saison alternée humide/sèche et la dégradation des voies d'accès une fois installées et mal entretenues ajoutent une dimension dynamique à ce problème.

Ces conditions concernent les populations locales, enclavées cycliquement, mais également tous les acteurs opérant dans ces régions (miniers, pétroliers, humanitaires et militaires), en limitant l'accès aux ressources et donc l'acheminement de la logistique. Ces difficultés conditionnent ainsi directement la croissance économique des pays concernés.

Résoudre ces problèmes nécessite de connaître les conditions de « traficabilité » des surfaces naturelles ou des axes routiers.

Le concept de traficabilité provient du terme militaire anglais « **trafficability** » (capability of terrain to bear traffic ; Lapedes, 2005; U.S Military Glossary Terms, 2006). Il se décrit par la capacité d'un terrain à supporter un mouvement continu de n'importe quel type de circulation (trafic), pédestre, équestre ou motorisée. Sa traduction a entraîné une série d'interprétations selon les besoins, qui convergent toutes sur l'interaction sol-machine. Dans la plupart des applications, ce concept renvoie d'une part à la mobilité (d'un véhicule) et d'autre part à la praticabilité (du sol) :

- la **mobilité** est une mesure de la vitesse maximale de déplacement d'une entité sur une surface (Haley *et al.*, 1979). L'évaluation de la mobilité concerne la progression du véhicule à travers une modélisation de ses capacités motrices, en fonction de ses interactions avec la résistance du sol au cisaillement (Patel *et al.*, 2004) ;
- la **praticabilité** désigne la capacité d'une route ou d'un sol à permettre le passage d'un véhicule (Soutter *et al.*, 2007). Elle est généralement exprimée par un indice de période (praticabilité permanente, semi-permanente, saisonnière ; Mahamat, 2006). La dégradation de la chaussée par l'usure ou les intempéries (orniérage, fissuration, fracturation, marche) affecte la praticabilité d'une route (STAC, 2006).

D'après Donlon et Forbus (1999), la **traficabilité** est « **une mesure de la capacité de circulation de véhicules à travers une région. C'est une relation entre un mobile et la surface sur laquelle il évolue. Savoir si une zone est traficable par un véhicule , dépend de ses caractéristiques de mobilité et des paramètres de terrain.** » En d'autres termes, la mesure de traficabilité revient à estimer la mobilité d'un véhicule sur une région praticable. C'est cette définition qu'on retiendra dans la suite de ce travail. Elle ne précise pas si la mesure de traficabilité doit être représentée sous forme chiffrée ou descriptive, mais insiste sur le besoin de caractériser géographiquement les paramètres influant sur cette mesure.

La connaissance des conditions de traficabilité dans les pays tropicaux est donc un besoin qui doit être satisfait soit dans la planification des missions, soit en temps réel, pour contraindre des itinéraires lors d'interventions urgentes. Pour que ces diagnostics soient intégrés dans des systèmes d'aide à la décision opérationnels, leurs coûts unitaires doivent être minimaux pour pouvoir les propager sur de très grands territoires. Ils doivent également être robustes pour s'adapter aux différentes zones climatiques et paysages rencontrés.

La situation actuelle se caractérise par une incapacité à fournir une estimation de traficabilité fiable hors mesures in-situ. Pour les travaux géotechniques (pénétromètres, scissomètres, tables vibrantes,...), les diagnostics de caractérisation des terrains ont de grandes difficultés à étendre les résultats des mesures aux territoires adjacents. Pour tenter de spatialiser ces informations, des approches tests ont été conduites à partir d'imagerie satellitaire (optique et radar principalement) mais n'ont pas offert pour l'instant de résultats généralisables à tous les types de paysages.

L'objectif de ce travail est de proposer une méthodologie de production de diagnostics de traficabilité des accès terrestres en contexte tropical et leur restitution cartographique associée. Ce projet n'ambitionne pas d'apporter une réponse universelle à la problématique de traficabilité, mais d'aborder ce concept par une approche originale, adaptée à la dynamique climatique des régions tropicales. Elle s'efforce d'utiliser l'ensemble des outils et ressources de l'observation de la Terre. Elle s'appuie notamment sur la démocratisation de l'offre des sources et services géographiques en ligne pour satisfaire les contraintes d'ubiquité, de délai et de coût.

La télédétection optique permet d'abord de caractériser dans l'espace les obstacles liés à l'occupation du sol. L'imagerie très haute résolution offre la capacité d'observer directement les voies de communication et leurs aménagements (entailles, buses, revêtements, accotements,...). Mais cette vision statique est confrontée à la cyclicité saisonnière du climat tropical qui transforme le paysage. En saison humide, les plaines se recouvrent de végétation et se chargent en humidité, les cours d'eau sont en crue et les routes se dégradent. Cette évolution implique qu'une dynamique de l'occupation du sol soit extraite des données de télédétection.

Les essais géotechniques au pénétromètre apportent une mesure de la résistance à la pénétration au cône. La spatialisation de cette mesure par imagerie est une option intéressante dans la production du diagnostic de traficabilité, à condition de formuler le lien entre la reconnaissance du sol et son comportement géomécanique. Elle requiert également une estimation de l'humidité du sol in situ. A petite échelle, les modèles hydrologiques ou d'assimilation fournissent une approximation satisfaisante de cette estimation. A grande échelle, les sources d'entrée de ces modèles (estimations atmosphériques, relief, végétation) ne sont plus assez résolues pour délivrer une estimation précise. La mise en service en 2007 de capteurs radar à Très Haute Résolution (THR), TerraSAR-X et Cosmo-Skymed, est envisagée comme une alternative intéressante. L'utilisation des ondes radar pour la mesure de l'humidité du sol a fait l'objet de nombreuses études. Opérant dans la bande X à une résolution jamais atteinte par des capteurs civils (1m), les capteurs THR requièrent une calibration de la sensibilité du signal en fonction de l'humidité du sol. Ces corrélations et spatialisations ont fait l'objet d'une partie spécifique de ce travail.

Les nouvelles sources d'informations, dites « ouvertes », issues d'initiatives publiques ou privées révolutionnent l'accès aux données existantes (qu'elles soient sous forme géoréférencées / cartographiques ou pas). Elles permettent de disposer d'un niveau minimal d'informations sur n'importe quelle région du globe. Cependant, la fiabilité de ces sources gratuites fait encore débat et l'intégration de ce type d'informations dans les processus de production est un risque qu'hésitent à prendre les acteurs institutionnels et industriels. Une partie de notre travail a porté donc sur l'analyse de la pertinence de ces sources dans le développement d'un système opérationnel d'estimation de traficabilité, à travers une typologie spécifique.

Nous avons restreint géographiquement notre étude sur les régions du Tchad situées sous le 13° parallèle, où la problématique d'inondabilité établit la traficabilité comme un enjeu crucial. Par sa position géostratégique, le pays conjugue des intérêts humanitaires, militaires, pétroliers et miniers. Les opérations logistiques s'y multiplient. Enfin, l'actualité contribue à produire un flux d'informations en sources ouvertes alimenté par une somme d'acteurs institutionnels et privés.

Cette zone sert d'exemple concret pour répondre aux objectifs suivants :

- Définir un ensemble de critères dimensionnant l'aide à la décision pour la problématique de traficabilité ;
- Etablir les corrélations entre la reconnaissance des sols par télédétection optique et leur comportement géomécanique pour aboutir à une spatialisation de la mesure de résistance à la pénétration au cône ;
- Procéder à la modélisation dynamique des éléments thématiques de l'occupation du sol à partir de données de télédétection ;
- Identifier l'apport potentiel des capteurs radar à Très Haute Résolution pour la spatialisation de l'humidité du sol ;
- Evaluer l'apport des données disponibles en sources ouvertes dans la production d'un système opérationnel de traficabilité.
- Elaborer un modèle de restitution semi-automatisé de la traficabilité, pour une exploitation dans des contextes de routine et d'urgence ;
- Représenter le diagnostic de traficabilité d'aide à la décision par une représentation cartographique avec une sémiologie adaptée ;

Ce travail est présenté en cinq chapitres.

Le premier chapitre propose un état de l'art des modèles de traficabilité, ainsi qu'un inventaire des critères retenus par les auteurs pour caractériser cette traficabilité. Il expose les principales limites de ces travaux et le besoin d'une approche spécifique au contexte tropical.

Le second chapitre présente l'architecture et les orientations méthodologiques de notre modèle d'estimation de la traficabilité, les méthodes de traitement des données de télédétection et l'articulation avec les informations de sources ouvertes, géographiques ou non. Il conclut sur les méthodes adoptées pour la restitution cartographique de la traficabilité.

Le troisième chapitre présente une étude du sol dans les régions d'étude, et de son environnement. Il propose une analyse détaillée des indicateurs du climat de la région du Tchad méridional dans le but de prévoir le comportement de la saison des pluies. Les corrélations entre les données pédologiques et la classification LPC/USCS des sols, première étape dans la spatialisation de la mesure de résistance à la pénétration au cône, sont établies en fin de chapitre.

Le quatrième chapitre présente les traitements des données de télédétection. Il se subdivise en quatre grandes parties :

- interprétations de l'occupation du sol dynamique à partir des capteurs optiques Landsat et MODIS ;
- qualification des données Quickbird issues de Google Earth, ainsi que leur processus de traitement ;
- potentiel des capteurs radar THR pour la spatialisation de l'humidité des sols et des pistes ;
- combinaison des résultats des analyses précédentes avec la praticabilité du réseau routier pour formuler un diagnostic de traficabilité et le représenter sous forme cartographique. Nous illustrons ce travail avec trois exemples représentatifs des paysages du Tchad méridional : la plaine de Laï, la région d'Adré, dans l'Ouaddaï, et la dépression du Salamat.

Le cinquième chapitre porte sur l'étude de la portée de notre travail. Il présente les risques associés à l'utilisation des données ouvertes dans la problématique de traficabilité. Il pose également les limites concrètes de l'approche proposée par son application à une autre zone tropicale, en République Démocratique du Congo.

Une conclusion générale présente les perspectives de développement de cette recherche.

La traficabilité dans les domaines civils et militaires : état de l'art

Le concept de traficabilité est un héritage militaire. L'objectif est de conférer un support stratégique au mouvement des forces sur le champ de bataille par une reconnaissance préalable du terrain (Haneberg, 2006). L'un des principaux enjeux est l'estimation de la capacité qu'offre ce terrain au passage des troupes, et donc de sa traficabilité.

En pratiquant une analyse pertinente du terrain, les stratèges militaires ont souvent bénéficié d'un avantage décisif sur leurs adversaires. L'Histoire en a conservé des traces :

- en 1066, Guillaume le Conquérant avait remarqué que les plages de galets de la baie de Pevensey, en Angleterre, pouvaient supporter l'accostage éclair de ses troupes. Il y déploya les hommes de ses 400 navires, et remporta la bataille d'Hastings (De Monmouth, 1135) ;
- les avantages stratégiques que Napoléon déployait lors de ses campagnes provenaient de son sens aigu d'analyse du champ de bataille. Ce fut notamment le cas à Austerlitz, le 2 décembre 1805 (Figure 1), où il avait parfaitement prévu et localisé le dégel des terres, responsable de l'embourbement de l'armée russe ;
- durant la Seconde Guerre Mondiale, les géologues militaires américains et anglais ont aidé à la planification du débarquement allié en Normandie le 6 juin 1944 (Rose, *et al.*, 2006) en produisant des cartes de mobilité des plages à partir des caractéristiques géotechniques des sables prélevés (Underwood, 1998).

Depuis 1813 aux Etats-Unis, le concept de traficabilité est intégré à la discipline de géologie militaire dispensée dans les enseignements. Depuis l'avènement des combats organisés modernes, les reconnaissances topographiques et géotechniques font partie du renseignement, ou « Terrain Intelligence » (Haneberg, 2006).

Si on peut trouver des applications similaires dans la logistique civile (recherche des meilleurs points de passage pour éviter le blocage des convois et l'optimisation économique des choix d'itinéraires), c'est dans une optique plus environnementale que les acteurs des domaines agricoles et forestiers ont également cherché un moyen d'estimer une forme de traficabilité. Les objectifs sont alors la préservation d'un espace forestier (Kokkila, 2001) ou la sécurisation d'un site écologiquement sensible (Gumos, 2005).

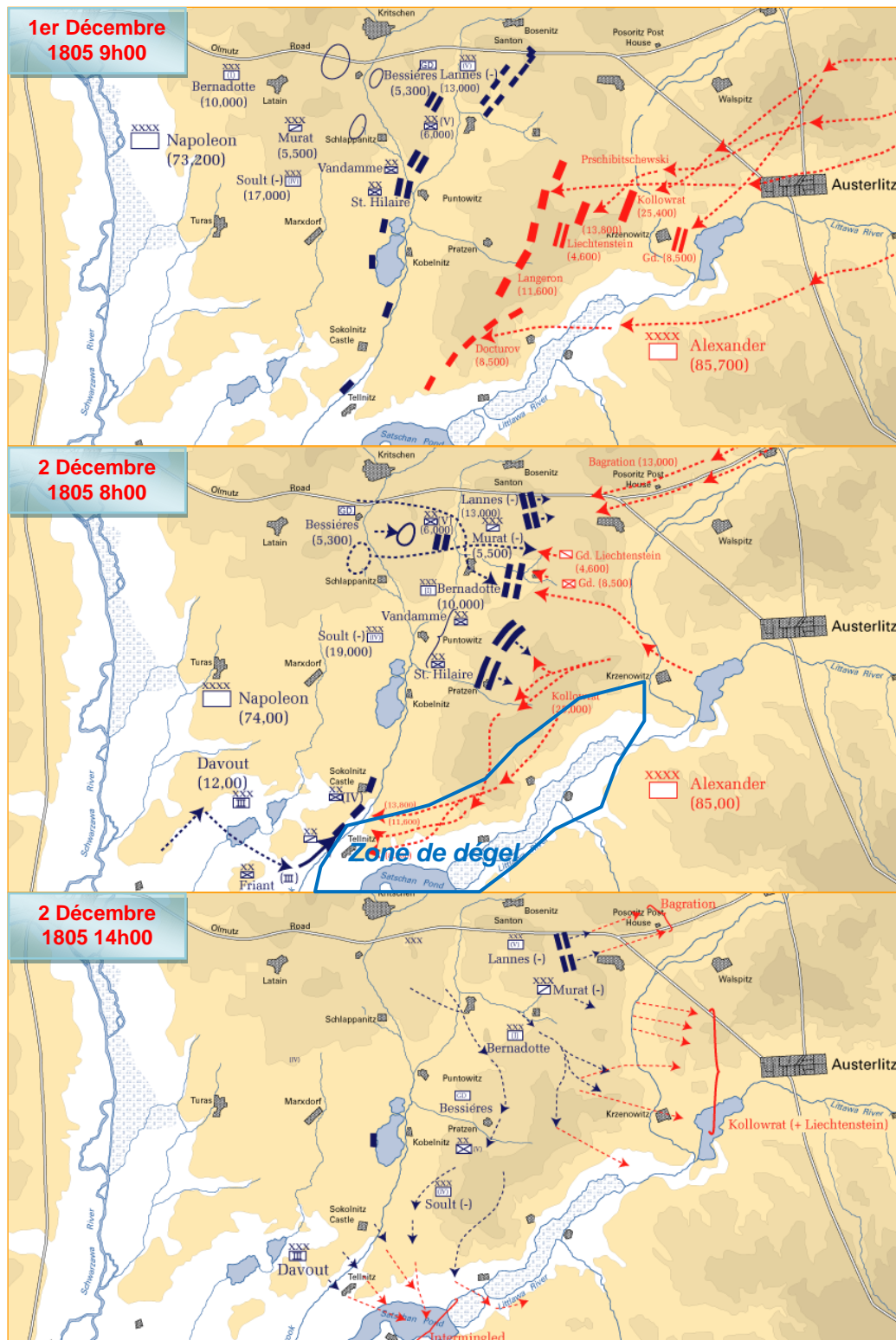


Figure 1 : Plan de la Bataille d'Austerlitz, qui opposa les forces de Napoléon 1er à celles du Tsar Alexandre 1er, en 1805 (Atlas of U. S. Military Academy)

La stratégie de Napoléon était de laisser les forces ennemies, installées sur le plateau de Pratzen qu'il occupait la veille, attaquer en premier pour les forcer à descendre. Ne pouvant attaquer sur le flanc nord, à cause du terrain trop accidenté, les forces russes et autrichiennes se sont concentrées sur le flanc sud, volontairement peu défendu. Le général Davout força l'immobilisation des troupes russes sur la plaine, embourbées par le martèlement des pas. L'armée affaiblie du Tsar fut ensuite repoussée sur les étangs gelés de Satschan où Napoléon ordonna l'artillerie. Il récupéra le plateau après seulement 8h de combat.

Les modèles de traficabilité ont été développés suivant les besoins spécifiques de chaque institution. Si Donlon et Forbus (1999) sont les premiers à évoquer une utilisation sémantique des SIG, la généralisation de cet outil dans la conceptualisation des modèles est tardive. Les approches tiennent compte des propriétés physiques des surfaces, des états mécaniques du sol (Kokkila, 2001), des conditions climatiques, des contraintes mécaniques du véhicule (Benoit, 2002; Saarilahti, 2002; Suvinen, *et al.*, 2002), mais chacun intègre ces paramètres à sa manière.

Ce premier chapitre vise à éclaircir un certain nombre de points, dont le premier sera de définir les critères dimensionnant de la traficabilité. Les approches théoriques et contextuelles des acteurs militaires et civils seront ensuite développées. Enfin, une attention particulière sera portée sur les modèles d'estimation de la traficabilité développés, leurs originalités, intérêts et limites.

1.1. Réflexions liminaires sur la traficabilité

Nous avons choisi de définir la traficabilité comme la « mesure de la capacité de circulation de véhicules à travers une région » (Donlon et Forbus, 1999). Sur cette base, il est important de clarifier les questions clés et les critères dimensionnants.

1.1.1. *Comment définir la traficabilité*

1.1.1.1. Route ou hors route

La traficabilité telle qu'elle est évoquée dans la littérature concerne les mouvements tout-terrain (*cross country* ou *off-road*), quelque soit le type de sols. Les auteurs ont donc mis au point des modèles portant sur la relation entre la mobilité des véhicules et certains paramètres de surface (couvert végétal, sol, relief) en postulant que la route est absente. Et cela pose un problème dans la restitution du diagnostic.

Théoriquement, pour une surface homogène, le trajet le plus court d'un point à un autre est toujours une ligne droite. Si le relief est pris en compte, deux trajets sont possibles : le plus court (direct mais avec une pente élevée) ou le plus facile (plus long mais avec une pente faible). Les auteurs (Kokkila, 2001; Suvinen, *et al.*, 2002; Gumos, 2005; Stahl, 2005) s'affranchissent du problème en associant une pente critique aux conditions mécaniques défavorables du sol (glissement, érodabilité...). Un algorithme va ensuite déterminer en fonction du « coût » de chaque surface, le trajet qui présentera le « coût » le plus faible.

Dans la réalité, plusieurs cas peuvent se produire. Lorsqu'une route praticable existe sur le trajet, la portion de tout terrain est réduite au plus court trajet pour accéder à cette route. Le trajet routier (*on-road*) est alors étendu au maximum. Mais si cette route est composée du même matériau que le tout terrain (par exemple pour les pistes africaines, d'argile et/ou de sable non compacté), son comportement face à l'eau sera identique (Benoit, 2002). Dans ce cas, le trajet tout terrain est à privilégier. Enfin, si la route est bloquée et donc impraticable (du fait de causes naturelles ou non), elle est alors considérée comme un obstacle. Le terrain devient la seule voie praticable possible.

La traficabilité hors piste (ou *off-road*) s'intéresse à qualifier le sol en terme de résistance au cisaillement face au travail du véhicule à sa surface, ainsi que les surfaces infranchissables, désignées sous le terme d'obstacles (Eichrodt, 2003),

La traficabilité routière (ou *on-road*) s'inquiète en revanche du revêtement et de l'état de la route (Brousseau & Le Turdu, 2005; Corté, *et al.*, 1992; Puech, 1989). Sur des routes goudronnées ou aménagées, les accotements ralentissent la formation d'orniérage, l'entretien régulier des pistes et des bas côtés aide les véhicules à maintenir leur vitesse de circulation. En revanche, en cas de rupture de la piste, le surplomb causé par l'accotement devient un obstacle à franchir pour le voyageur.

1.1.1.2. Prise en compte du convoyage

Le convoyage concerne la progression de colonnes de véhicules (U.S. Army Field Manual, 1994). Il n'est évoqué dans la littérature que comme un élément facultatif dans la modélisation de la traficabilité. En revanche, il fait partie du concept de mobilité, qui considère toutes les caractéristiques du terrain pouvant impacter sur les performances de locomotion du véhicule.

Le convoyage provoque une sollicitation mécanique de la structure du sol. Elle se caractérise par deux phénomènes : la scarification et le bulldozing.

La **scarification du sol** crée un sol bicouche composé d'un sol remanié surmontant une couche de sol non remanié. On recherche alors une profondeur critique, en dessous de laquelle le sol adopte un comportement non remanié. Benoît et Gotteland (2002) ont mis au point le dispositif expérimental DECART (Dispositif Expérimental de CARactérisation de la Traficabilité), afin de retrouver cette profondeur par le biais d'essais in situ d'enfoncement de plaque. Ils valident cette approche par des essais au laboratoire (essais Proctor) et calculent ainsi la courbe pression-enfoncement sur trois types de sols de natures différentes (Benoit & Gotteland, 2005a).

Le **bulldozing** est une résistance à l'avancement qui se manifeste lorsqu'un véhicule circule exactement dans les traces du précédent. Les roues arrières, plus larges, sont ralenties par le matériau qui a été évacué de chaque côté des roues avant, plus étroites (Patel et al., 2004). La résistance au bulldozing devient un problème lorsque l'enfoncement des roues dépasse 0,06 fois leur diamètre (Patel, *et al.*, 2004). L'effet de bulldozing fait l'objet de recherches spécifiques dans le domaine des véhicules d'exploration planétaires (Gibbesch et Schäfer, 2004 ; Carrier, 2006).

Tous les modèles de traficabilité existant sont cependant basés sur le passage d'un seul véhicule, car seuls des essais géotechniques réguliers permettent d'approcher une modélisation de ces phénomènes (Breune, 1997).

1.1.2. Critères de caractérisation de la traficabilité

L'estimation de la traficabilité telle qu'elle est pratiquée sur le terrain par les ingénieurs géotechniciens sur les environnements routiers, forestiers et agricoles, est bien différente des critères choisis pour sa caractérisation par des modèles conceptuels précédents.

1.1.2.1. Evaluation géotechnique de la traficabilité des sols

Traditionnellement, la traficabilité est évaluée par des essais géotechniques normalisés réalisés in situ. Ils sont complétés par des essais au laboratoire afin d'identifier la nature et le comportement mécanique du sol. Ces essais sont au nombre de trois :

- l'**essai au pénétromètre** mesure la résistance à la pénétration d'un cône dans le sol. Historiquement, les militaires utilisent un pénétromètre standard WES (USA Corps of Engineer Waterways Experimental Station) portatif. Dans le secteur civil, les essais de reconnaissance des terrassements routiers sont réalisés par différents types de pénétromètres, statiques ou dynamiques (Figure 2) ;

- l'**essai au scissomètre** de chantier consiste à mesurer la résistance au cisaillement d'un sol en appliquant une rotation à un moulinet à quatre pales (scissomètre). Le couple de torsion est directement relié à la résistance au cisaillement du sol par un coefficient, qui est fonction de la géométrie du moulinet (Amar & Jézéquel, 1998) ;
- l'**essai à la plaque** est un essai de chargement à la surface du sol à l'aide d'une plaque rigide circulaire. On mesure l'enfoncement de la plaque, ou déflexion, en appliquant une charge statique. On en déduit un module spécifique (module de Westergaard) qui caractérise la portance du sol .

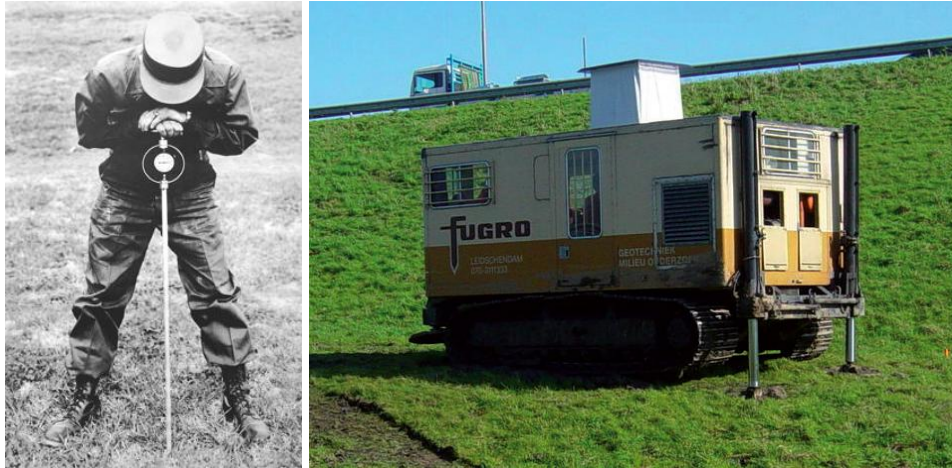


Figure 2 : Exemples de pénétromètres utilisés pour l'étude du comportement mécanique des sols

A gauche, un pénétromètre standard WES, utilisé par les corps d'armées pour évaluer la traficabilité seule. A droite, un pénétromètre statique REO 45 chenillé. Son utilisation est spécifique des terrains difficiles. Equipement Fugro Géotechnique S.A.

La géotechnique routière utilise une classification des sols qui lui est spécifique. Chaque classe rassemble des sols présentant un comportement mécanique suffisamment similaire pour qu'il soit possible de leur appliquer les mêmes conditions d'utilisation en tant que couche de forme (LCPC-SETRA, 1992). L'une des fonctions principales de cette couche de forme est d'assurer la traficabilité des engins d'approvisionnement des matériaux. Leur condition d'utilisation est ensuite déduite des variables de nature et de l'état hydrique du sol à un instant donné.

La classification géotechnique routière repose sur des caractéristiques obtenues par des essais d'identification géotechnique en laboratoire : granulométrie par tamisage, détermination des limites d'Atterberg, valeur au bleu de méthylène. Ils peuvent être complétés par des essais de caractérisation mécanique de sols, afin de prévoir le comportement du sol à la rupture (essai triaxial), ou leur aptitude au compactage selon différentes conditions d'humidité (essai proctor).

1.1.2.2. Critères de caractérisation de la traficabilité en zone tropicale

Les auteurs n'abordent pas tous la conceptualisation de la traficabilité sous le même angle, et par conséquent, les critères utilisés pour caractériser cette problématique souffrent d'une certaine hétérogénéité terminologique. Les approches s'orientent dans deux directions distinctes, suivies dans les secteurs civils et militaires :

- soit vers la caractérisation du comportement mécanique et géomécanique des sols par une démarche expérimentale dérivée de la théorie de la mobilité (Benoit, 2002; Benoît & Gotteland, 2002; Birkel, 2003; Edlund, 2004; Benoit & Gotteland, 2006; Carrier, 2006 ; Gotteland et Benoit, 2006),
- soit en reliant la traficabilité à des critères géographiques. Dans ce cas, l'estimation de la traficabilité est exprimée par le résultat du croisement de paramètres de terrain (végétation, relief, obstacles, sols) avec une information climatique (Kokkila, 2001; Saarilahti, 2002; Eichrodt, 2003; Graff, 2003; Slocum, *et al.*, 2003; Gumos, 2005).

L'analyse de la littérature permet de dégager la liste des paramètres principaux (Figure 3). Ils se classent en trois catégories principales : critères de terrain permanents, critères de terrain dynamiques et critères propres aux véhicules considérés.

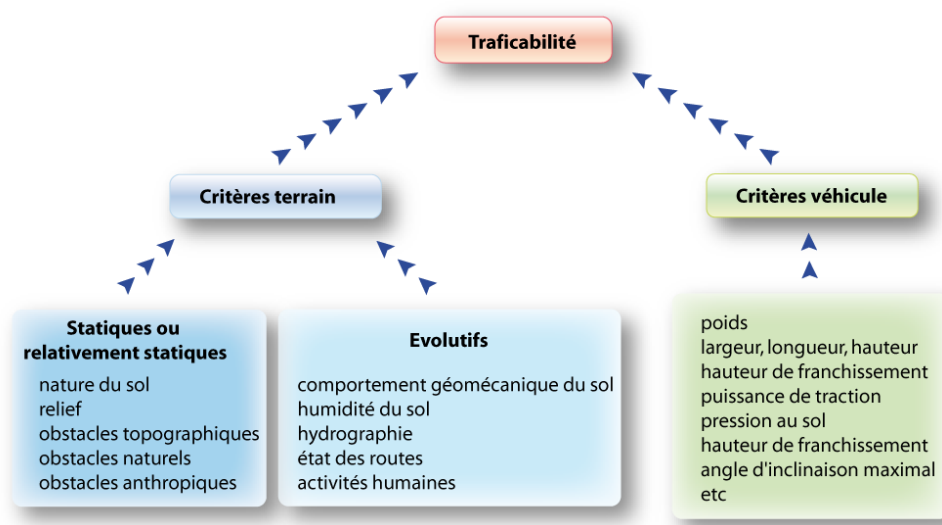


Figure 3 : Liste des paramètres d'estimation de la traficabilité

1.1.2.2.1. Propriétés statiques du terrain

La **nature des sols** est un critère de classification des sols . Cependant, il n'existe pas de système universel de classification des sols et chaque pays, institution ou organisme spécialisé, a développé la sienne. Il convient donc de préciser quelle classification est la plus appropriée à la caractérisation de la traficabilité.

La classification USCS (Unified Soil Classification System) distribue les sols en 15 catégories, en fonction de leurs propriétés géomécaniques, leurs granulométrie, et leurs limites d'Atterberg. Soumis aux recommandations du Terrain Analysis Field Manual (U.S. Army Field Manual, 1990), tous les modèles de mobilité et de traficabilité militaires américains (Graff, 2003; Slocum, Surdu, Sullivan, Rudak, Colvin, & Gates, 2003) ainsi que les études civiles de traficabilité des régions tempérées et nordiques (Kokkila, 2001; Eichrodt, 2003; Gumos, 2005) utilisent cette classification. Pour leurs besoins spécifiques (sols gelés, berges, désert), certains auteurs ont préféré affiner certaines classes (Shoop, *et al.*, 2005; Coutermarsch & Dwinal, 2003; Richmond, *et al.*, 2004), voire établir une nouvelle classification uniquement à partir de certains facteurs géomécaniques (consistance, capillarité, perméabilité, résistance à l'enfoncement, au roulement ; Saarilathi, 2002; Suvinen, *et al.*, 2002; Benoit, 2002).

Le **relief** représente, pour la traficabilité, un facteur d'obstacle (ruptures de pentes, accidents topographiques type falaise ou bloc rocheux), ou un pondérateur de paramètres géomécaniques. Le facteur de pente intervient directement sur la capacité motrice des engins (Carrier, 2006; Curkendall *et al.*, 2006), soit par l'angle qu'elle forme avec l'horizontale (ou degré de pente), soit par l'angle formé entre deux facettes (rupture de pente). La pente intervient également indirectement en agissant sur l'adhérence du sol (Saarilathi, 2002; Suvinen *et al.*, 2002). Certains auteurs en dérivent un Topographic Wetness Index (Beven & Kirkby, 1979), pour estimer la capacité d'infiltration du sol en fonction de la pente (Yang *et al.*, 2005; Hengl *et al.*, 2001).

Tout objet naturel ou tout autre artefact bloquant ou déviant la progression de véhicules (infrastructures, rivières, lacs, marécages, jungles, villes, tranchées, barrières, arbres) est considéré comme **obstacle**. Dans les dispositifs militaires, la caractérisation des obstacles permanents, ou surface « NoGo », est l'objet d'une procédure de reconnaissance spécifique (OCOKA dans le langage militaire américain pour Observation, Cover and Concealment, Obstacles, Key Terrain, Avenues of Approach). Le dimensionnement de ces obstacles est réalisé par photo-interprétation.

1.1.2.2. Paramètres évolutifs de terrain

La caractérisation de l'**hydrographie** porte sur la restitution temporelle et spatiale des barrières hydriques, du réseau hydrographique, de l'étendue des inondations et, dans certains cas, également de la hauteur d'eau. Dans les régions tempérées, l'intégration des barrières hydriques reconnues par imagerie optique (Yesou *et al.*, 2003 ; Yoon *et al.*, 2003 ; Gianinetto *et al.*, 2006 ; Sertit, 2006) donne de bons résultats (Meinel *et al.*, 2003; Allenbach *et al.*, 2006). En région tropicale, l'activité hydrologique du réseau hydrographique est cyclique : réduit à un débit d'étiage en période sèche, le cours d'eau principal a tendance à s'épandre en saison humide et déborder dans de larges plaines alluviales. Ces cycles varient chaque année en durée et en étendue et sont très difficilement prévisibles par des modèles hydrologiques. L'imagerie radar permet cependant de détecter ce réseau sous couvert végétal et nuageux (Hess *et al.*, 1995 ; Rudant *et al.*, 1997 ; Rosenqvist *et al.*, 1998 ; Rosenqvist *et al.*, 1999 ; Hess *et al.*, 2003 ; Lacoste, 2004) et de suivre ainsi son évolution temporelle tout au long de la saison humide afin de décrire l'étendue maximale d'inondation (Laugier *et al.*, 1997 ; Yesou *et al.*, 2001 ; Boivin *et al.*, 2003). Le débit des cours d'eau intermittents des régions semi-désertiques (ou oueds) sont bien estimées à partir de méthodes d'écoulement de surface. Mais la prévision de la durée de cet écoulement ainsi que les moyens d'observation par imagerie sont aujourd'hui mal connus.

Pour la traficabilité, l'**humidité du sol** est le paramètre hydrique le plus important à toutes les échelles car il en conditionne les propriétés géomécaniques (portance, résistance de pénétration au cône, adhérence). Dans la plupart des modèles, l'humidité du sol est un paramètre observé sur le terrain et décrit en 3 à 5 classes qualitatives. On distinguera généralement : trempé, humide et sec (Ahlvin & Haley, 2001; Gumos, 2005). Les essais par télédétection radar (Cui *et al.*, 2004 ; Ndemo Bogonko, 2005 ; Chauhan *et al.*, 2003 ; Bryant *et al.*, 2003 ; Jackson, 1993 ; Jackson *et al.*, 1996 ; De Jeu, 2003 ; Calvet *et al.*, 1996) ont démontré de bonnes aptitudes pour la restitution spatiale de l'humidité des sols, avec des écarts maximaux de 5 à 10 % par rapport aux mesures de terrain (Oh *et al.*, 1992 ; Oh *et al.*, 2002 ; Zribi *et al.*, 2002 ; Srivastava *et al.*, 2003 ; Baghdadi *et al.*, 2006).

En revanche, ces travaux scientifiques n'aboutissent pas à des résultats opérationnels et la calibration des images radar requiert nécessairement des mesures de terrain pour une interprétation précise.

Les **propriétés géomécaniques** requises pour l'estimation de la mesure de traficabilité varient selon le type de situation. Selon le Field Manual 5-430-00-1 (U.S. Army Field Manual, 1994), la traficabilité est évaluée par le seul indice de résistance à la pénétration au cône (Cone Index CI), mesuré sur le terrain. Certaines études (Ahlvin & Haley, 2001 ; Benoit, 2002 ; Saarilahti, 2002 ; Parsons, 2004) utilisent une liste exhaustive de paramètres (forces de cohésion, de résistance à l'enfoncement et au roulement, plasticité et densité du sol), à partir de mesures faites sur des terrains équipés et en laboratoire. Si les résultats de ces essais sont concluants en laboratoire, la spatialisation de ces mesures est un problème qui n'a pas été résolu. Dans tous les cas, les études de traficabilité ne s'intéressent qu'au comportement mécanique des premiers 40 cm du sol, appelée « couche critique ». Leurs propriétés mécaniques évoluent rapidement en fonction du taux d'humidité et de la densité apparente du sol (Hoodmoed & Klaij, 1997).

Les **routes** et les pistes sont soumises à des dégradations structurelles (orniérage, nid de poules, érosion) qui affectent durablement leur praticabilité. En zones climatiques extrêmes (grands froids ou zones tropicales humides), les études faites en pays tempérés ne peuvent s'appliquer aux conditions climato-géographiques observées. Les études d'amélioration des conditions de circulation dans ces secteurs géographiques ne permettent pas une prévision de la dégradation mais seulement un état des lieux et une identification des moyens à mettre en œuvre pour la résorber (Nogami & Villibor, 1991; Makasa, 1998).

1.2. Applications civiles de la traficabilité

Le problème de traficabilité concerne potentiellement tous les secteurs d'activités impliquant des déplacements de véhicules au moins en partie en tout terrain. Mais pour y répondre, tous les secteurs n'ont pas envisagé de développer un système d'évaluation. Pour de nombreuses applications de logistique industrielle (notamment dans le domaine de l'exploration ou de l'exploitation pétrolière), les aléas liés à la traficabilité terrestre ont encouragé le principe de précaution. Les risques sont minimisés par une planification des opérations éloignée de la saison des pluies. C'est également le cas dans le domaine des raids touristiques, à l'exception de cas spécifiques pour lesquels les risques liés au terrain font partie du défi.

L'analyse de la littérature montre des travaux civils importants dans deux types de zones extrêmes sur lesquelles les difficultés de déplacement sont permanentes ou quasi-permanentes. En premier lieu, les grands déserts sur lesquels les travaux visent à pallier les risques de ralentissement ou de blocage des convois logistiques dans des zones présentant divers dangers (points d'eau, bandes armées). En second lieu, les zones nordiques de permafrosts et de forêts boréales sur lesquelles on cherchera à garantir la préservation des milieux par les acteurs économiques impliqués dans la gestion et l'exploitation des ressources naturelles (forêts, minerais, pétrole, gaz). On peut y ajouter des travaux sur la traficabilité sur des zones tempérées en conditions extrêmes, en particulier après des inondations catastrophiques.

En milieu tropical, en raison de la complexité des paramètres du milieu, les études d'impact sont très ciblées sur les conditions de circulation (*road conditions*) et, notamment, sur l'optimisation de remblais latéritiques pour améliorer la praticabilité des routes (Nogami & Villibor, 1991 ; Makasa, 1998).

Ces travaux peinent souvent à dépasser la sphère recherche (indispensable pour l'étude scientifique des phénomènes) et à se transformer en systèmes opérationnels (et industriels), mêmes imparfaits. On remarquera qu'un des aspects ayant nui au développement plus large de travaux de modélisation sur ce sujet tient à l'absence de données géospatiales. L'évolution de la situation en matière de disponibilité de données géographiques de base (cf. ch2) conduira vraisemblablement au développement de travaux plus importants.

1.2.1. Travaux sur les zones désertiques ou tropicales

En zone désertique, les travaux de Baghdadi *et al.* (2004) ont abouti à la mise au point d'un système d'estimation de traficabilité basé sur le traitement d'images satellitaires radar ALOS en bande L (Figure 4). La bande de fréquence L a la capacité de pénétrer les premiers mètres du sol, dans des conditions désertiques. Les capteurs radars utilisant cette fréquence sont alors très sensibles à l'humidité du sol. Réalisé dans le cadre d'un projet de cartographie du BRGM en Mauritanie, la mesure s'est démontrée opérationnelle, mais uniquement en zone aride.

Parmi les systèmes d'observation radar aujourd'hui accessibles, le satellite japonais ALOS ouvre des possibilités intéressantes d'amélioration dans ce sens par sa résolution spatiale inférieure à 15 m en bande L. Les autres satellites radar, Cosmo-Skymed et TerraSAR X, utilisent la bande X. L'intérêt potentiel de ces nouveaux capteurs satellitaires pour la mesure de la traficabilité en zone désertique a même entraîné la mise en œuvre d'ateliers de recherche sur le terrain dans le désert du Mojave (Hibbits & Gillespie, 2005).

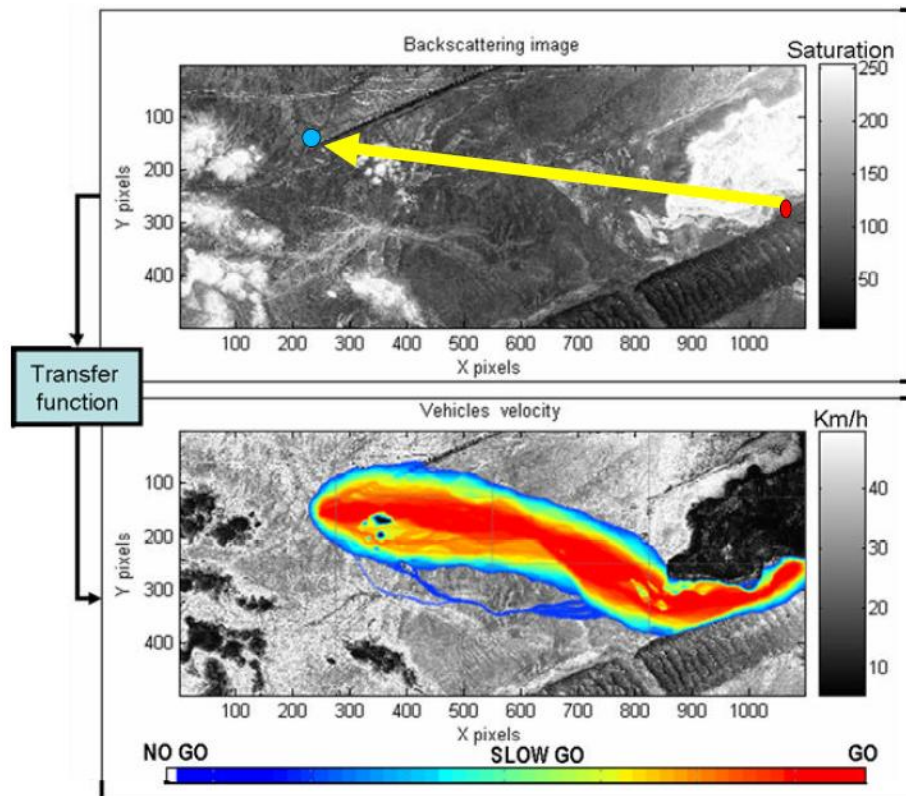


Figure 4 : Image d'amplitude (en haut) et de vitesse (en bas) du radar ALOS, avec la représentation du trajet optimum, d'après Baghdadi, et al., 2004 et Grandjean, comm. perso.
Chevelu coloré : du bleu au rouge, la probabilité que le trajet soit le plus rapide.

Une autre approche intéressante de gestion de la traficabilité a été développée au Darfour, qui mobilise plus d'une centaine d'ONG à but humanitaire, encadrées et coordonnées par les organisations internationales. Dans ce cadre, les antennes régionales des Nations Unies, Joint Logistics Centre (UNJLC) et de l'Office for Humanitarian Affairs (OCHA) ont produit depuis 2006, pendant toute la saison des pluies, des cartes hebdomadaires de prévision d'inondation et de traficabilité des pistes, pour toute la région (www.unjlc.org, www.ochaopt.org). Elles sont basées sur les commentaires des chauffeurs de véhicules logistiques sur le terrain, suivis par positionnement GPS, et comparées aux prévisions météorologiques et à l'observation des précipitations (Figure 5). Ce service cartographique en ligne et en libre accès est opérationnel depuis 2006, mais son architecture est conceptualisée depuis 2000 (Riedlinger *et al.*, 2000), dans le cadre du programme européen GMOSS.

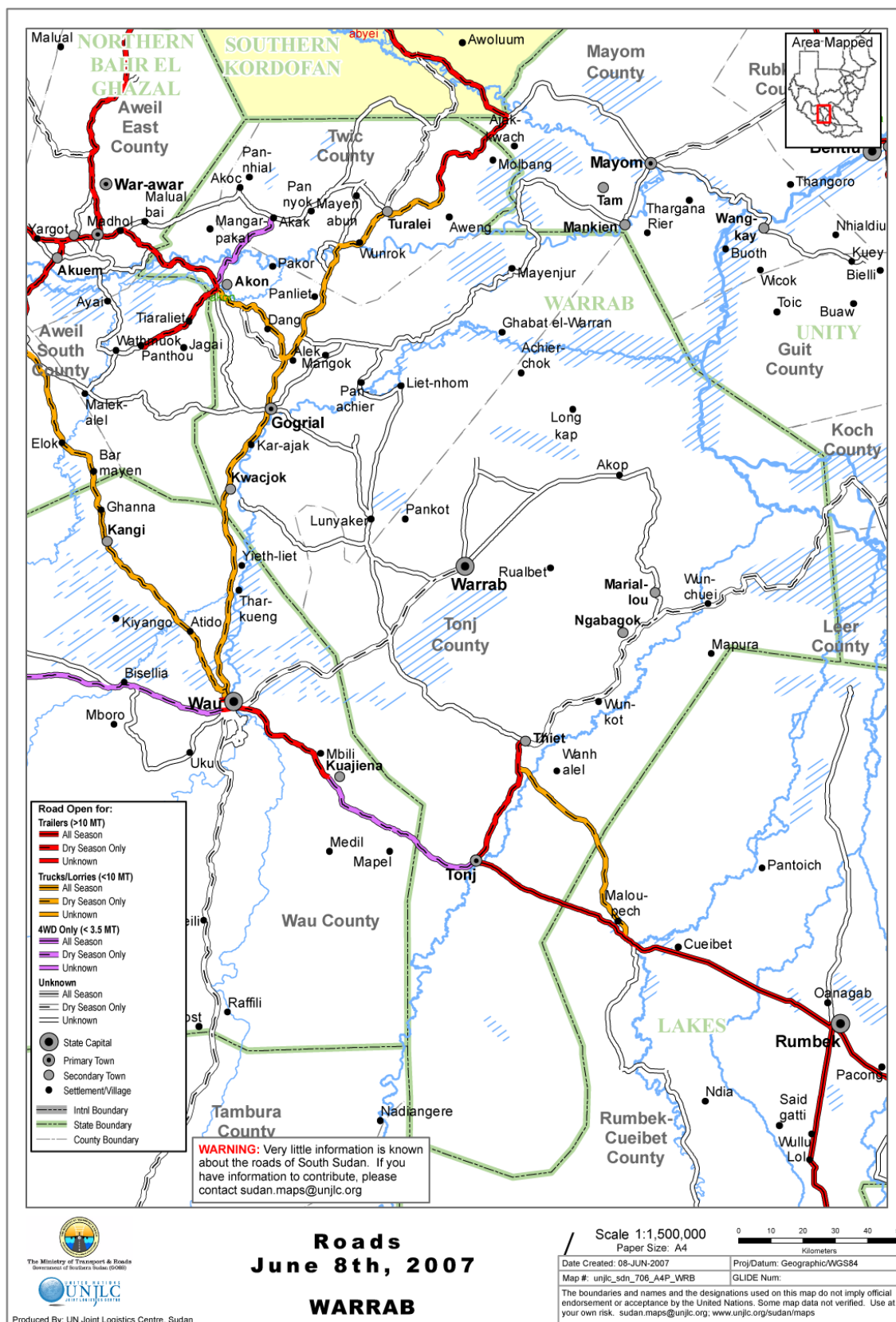


Figure 5 : Exemple de production de UNJLC sur le Sud Darfour (source reliefweb.int)

1.2.2. Projets forestiers et agricoles en zones boréales

Dans les régions boréales, les compagnies forestières se sont attachées à rentabiliser leurs exploitations (Figure 6), tout en minimisant l'impact de leurs activités (Gold, 1998). Le projet européen ECOWOOD a été élaboré dans l'optique de conserver cette production tout en préservant l'environnement. L'utilisation intensive des véhicules de récolte et d'extraction forestière sur les sols humides, et notamment en période de dégel, est un facteur d'érosion important et affecte durablement la compaction des sols (Startsev & Mc Nabb, 2001; Prudente, 2003 ; Vega-Nieva, *et al.*, 2009). Le projet propose une meilleure gestion des engins par le développement de modèles, notamment à partir d'une base SIG.

Kokkila (2001) propose, dans ce projet, une estimation de la mesure de traficabilité par une caractérisation du terrain. Il développe son modèle sur une base SIG et détermine les facteurs à superposer en couches de données :

- MNT et hydrographie,
- dépôts quaternaires, couverture végétale et occupation du sol,
- réseau routier et cadastre,
- observations ponctuelles de terrain, notamment microrelief et figures d'érosion,
- données climatiques.

Pour rendre ce système opérationnel, l'auteur teste son approche sur une surface de 0,5 ha, divisée en une grille régulière de points de mesure (résistance du sol au pénétromètre et humidité). Il justifie son utilisation du SIG par la continuité des variables de terrain et parce qu'il constitue la meilleure base organisationnelle entre les acteurs du secteur forestier. L'originalité de ce projet réside non pas dans la recherche du meilleur itinéraire possible, mais dans l'évitement des lieux les plus « sensibles » (dans le sens écologique). Malgré sa portée restreinte aux forêts finlandaises, cette étude propose un contenu méthodologique qui peut se rapprocher de notre problématique.

Le modèle de mobilité de Suvinen *et al.* (2002) a pour objectif de déterminer une route tout-terrain optimale. Il s'appuie sur le modèle d'interaction sol-véhicule développé par Saarilahti (2002). L'auteur considère la praticabilité du terrain en fonction de la résistance du sol à la friction des roues. Il conserve cependant les deux catégories de facteurs, permanents et évolutifs. Toutefois, par l'intégration de paramètres spécifiques aux sols gelés de Finlande et à la mécanique des tracteurs forestiers, la portée de ce modèle ne s'applique pas à l'Afrique.



Figure 6 : Exemple de nouveaux engins développés pour réduire les impacts de l'exploitation forestière.

Ces engins font « moins de dégâts que le pied d'un homme », selon le constructeur Gormanbros (<http://www.gormanbros.com>)

En conservant une méthodologie similaire à celle développée par Kokkila (2001), Eichrodt (2003) construit son modèle d'évaluation de la traficabilité, baptisé TES (*Trafficability Evaluation System*). Le principe consiste à suivre pendant deux mois, 50 points sélectionnés aléatoirement à partir de données d'écoulement de l'eau en surface (appelé TopoIndex) sur lesquels les analyses portent sur deux critères précis : l'indice de résistance à la pénétration au cône (*Cone Index* - CI) et la teneur en eau. L'auteur élabore ensuite un modèle empirique qu'il valide avec les données du TopoIndex. Il tire de ses recherches 3 diagnostics intéressants. Premièrement, pour des conditions de sols spécifiques testées, 95% de la surface est accessible pour des engins chenillés, alors qu'elle n'est que de 42% pour des engins à roues. Le deuxième diagnostic établit que la dépressurisation des pneus est un facteur déterminant d'augmentation de la traficabilité des surfaces. Troisièmement, en comparant les teneurs en eau par période, il établit que les conditions d'accès sont variables avec les conditions climatiques. En menant une étude de terrain continue, l'auteur a établi que les phénomènes dynamiques doivent être pris en compte pour accomplir une analyse performante de la traficabilité.

Enfin, le modèle de traficabilité *off-road* élaboré par Gumos (2005) sous ArcGIS se différencie des exemples précédents par une approche plus théorique. Les effets de la surface interviennent sur la traficabilité comme un coefficient de ralentissement. Il superpose les facteurs de sol, de pente et d'obstacles pour ajuster ce coefficient. Il extrait ensuite de la carte obtenue par fonction de *Cost Distance*¹, le trajet le plus court et le plus rapide. Les originalités de ce modèle résident dans l'approche très géographique, dans sa décomposition du paysage en secteurs (pixels) Go et NoGo, et dans la construction d'une base de données des paramètres de sol. En revanche, il s'appuie, à l'instar de ses prédécesseurs nordiques, sur un niveau de renseignement très détaillé sur son secteur d'étude. Une grande partie de son travail se résume à extraire du MNT les informations compatibles avec les données de sols et hydrologiques. Enfin, le modèle ne vise pas à automatiser le processus ni à être reproduit en dehors de la Suède.

1.2.3. Projets dans la gestion des risques en zones tempérées

La confrontation des aléas et des moyens logistiques à mettre en œuvre pour l'accès à un site vulnérable se rapporte à la problématique de traficabilité.

Pour le secteur minier, le transport des matières premières, du point de production au centre de traitement, doit être assuré toute l'année, quelles que soient les conditions climatiques. Les aménagements réalisés ont deux objectifs :

- soit de ralentir la dégradation du terrassement par le compactage de stériles granohétérogènes pour faire acquérir au sol une résistance mécanique capable de supporter le poids des camions de chargement (Ricard *et al.*, 1995 ; Thompson *et al.*, 1999; Wickland *et al.*, 2005). Cette solution n'a été envisagée que pour des mines à ciel ouvert (Mine des Terrains Aurifère, Québec ; Afrique du Sud) ;

¹ *Cost Distance : fonction de calcul d'itinéraire en prenant en considération les plus faibles valeurs de pixel. Ces valeurs sont les résultats d'une somme pondérée de facteurs (*Cost Path*)

- soit de maintenir la qualité du terrassement sur l'année, par l'évacuation des eaux de pluies (ponts, buses, accotements). Ces infrastructures peuvent supporter des pics d'inondations exceptionnelles (occurrence inférieure à 25 ans, Ziemer & Mahagan, 1991).

Notons que les études qui amènent à la prise de décision de l'installation de ces aménagements sont internes aux entreprises. Elles sont réalisées par des expertises sur le terrain, au cas pas cas.

Par ailleurs, en matière de gestion des risques liés aux inondations, l'évacuation des sinistrés s'effectue par les accès les plus traficables. Dans les secteurs à risque, l'aménagement des axes permet d'élaborer des scénarii d'actions efficaces et ainsi tendre vers une diminution de ce risque (Silvertün et Gumos, 2007). Les efforts entrepris dans ce sens concluent au besoin d'une cartographie dynamique et normalisée, comme support d'aide à la décision (Cova, 1999; Wallingford, 2006).

Par suite des désastreuses inondations qui ont sévi dans toute l'Europe centrale en 1997 et 2002, le travail d'Adrienko et Adrienko (2003) s'est concentré *de facto* sur la réévaluation des modèles militaires de traficabilité en vue de les appliquer aux milieux saturés en eau. Ils estimèrent que les facteurs déterminants d'estimation rassemblaient : la pente, le microrelief, la couverture végétale, l'hydrographie, l'état hydrique et le type de sols, le réseau routier et ferroviaire, le climat et les objets anthropiques.

1.3. Traficabilité militaire : concept de renseignement préparatoire au combat

1.3.1. *Contexte*

Dans le contexte de préparation au combat, la production des diagnostics de traficabilité est un des éléments qui s'inscrit dans un processus de décision. Ce processus s'étend de la collecte des informations à l'exécution du plan d'action (Figure 7).

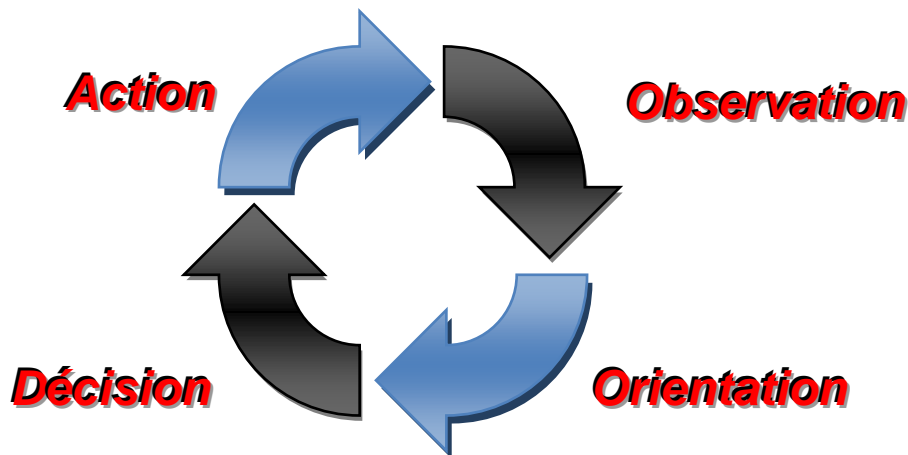


Figure 7 : Boucle OODA utilisée dans les systèmes d'information des armées occidentales

Les unités de renseignement doivent fournir les éléments permettant de proposer au commandement des actions à mener lors des opérations par le biais de comptes rendus textuels ou cartographiques. Un modèle de traficabilité développé dans une optique strictement militaire doit contribuer aux objectifs suivants :

- procurer une vision claire du champ de bataille et de l'ennemi, à travers des procédures d'analyses du terrain (Intelligence Preparation of The Battlefield par exemple) ;
- formuler des recommandations et diagnostics, afin de souligner les problèmes spécifiques qui adviendront dans la future opération, anticiper et prévoir les variations climatiques par exemple ;
- créer des scénarii afin d'anticiper les réactions de l'ennemi et des différents acteurs du théâtre d'opérations.

1.3.2. *Exemple américain de l'Intelligence Preparation of the Battlefield (IPB)*

L'« Intelligence Preparation of the Battlefield » est une procédure de renseignement préparatoire au combat de l'armée américaine (U.S. Army Field Manual, 1991). Elle est réalisée dans le but de fournir une vision globale de l'environnement dans lequel les unités auront à travailler, tout en déterminant de façon précise les paramètres qui influenceront sur le déroulement des opérations (Figure 8).

Elle conseille le commandement sur les voies et modes d'accès aux objectifs, ainsi que sur les avantages et les risques du terrain pour les unités engagées dans l'opération. L'IPB est un modèle américain qui trouve ses équivalents dans les autres armées.

Pour atteindre ces objectifs, tous les types d'informations doivent être analysés, aussi bien de sources militaires (topographiques, météorologiques, images satellites et aéroportées, rapports militaires ou scientifiques) que civiles et disponibles via internet (géologiques, botaniques, architecturales, ethnologiques, sociologiques, économiques, et politiques).

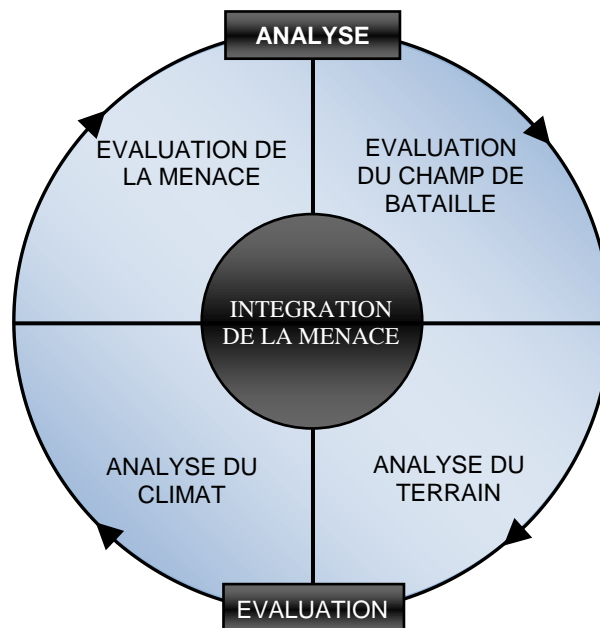


Figure 8 : Procédure américaine, « Intelligence Preparation of the Battlefield », d'après le Field Manual 34-130 (US Army Field Manual, 1991)

A la date où cette procédure a été établie (1991), il pouvait paraître illusoire d'espérer disposer de l'ensemble des informations source et d'être capable de les analyser et de les fusionner. Il paraît aujourd'hui possible de s'inspirer de cette démarche en s'appuyant sur Internet et sur les nouvelles dimensions collaboratives d'accès à l'information.

1.3.3. Traficabilité dans le système de l'US Army

Le renseignement militaire peut être collecté de manière prévisionnelle à des fins stratégiques, c'est-à-dire qu'il peut être utilisé sur des échelles de distances et de temps très longues, mais à l'inverse, il peut être tactique ou opérationnel, exploité immédiatement sur le théâtre des opérations.

Pour répondre à ces exigences, l'armée américaine dispose aujourd'hui de systèmes numériques de commandement et d'une vision interactive du champ de bataille (Monnerat, 2000). Les unités engagées sur le terrain sont équipées de systèmes leur permettant de se positionner et de récupérer ou de demander en temps réel les dernières informations pour assurer la connaissance de la situation ("situational awareness" ; Monnerat, 2001).

Pour la partie environnementale, ils s'appuient sur des systèmes d'intégration de données de type météorologique (Integrated Meteorological System - IMETS) ou topographique (Digital Topographic Support System - DTSS).

On étudiera donc en détail en partie 4 de ce chapitre les modèles utilisés dans ces systèmes américain mais on veillera à ne pas faire d'amalgame avec les moyens européens. Les moyens mis en place par l'armée américaine sont sans équivalent et si les systèmes de connaissance en temps réel de la situation commencent à devenir une réalité en Europe, leur émergence est lente, essentiellement pour des raisons budgétaires. Mais la prise de conscience et le besoin d'un système opérationnel d'aide à la décision donnant une mesure de traficabilité existent.

1.3.4. Conséquences des travaux de traficabilité militaire pour notre étude

Par rapport aux travaux civils étudiés, l'originalité des systèmes militaires tient à l'ampleur et à la diversité des zones d'intérêt, à l'utilisation très large de systèmes d'observation satellitaires, aéroportés ou de théâtre et à l'accès croissant aux sources d'information ouvertes et bases de données environnementales civiles.

Elle tient également à une vision multi-échelles tant temporelles que spatiales.

Pour préparer l'opération, le renseignement doit considérer les évolutions futures de phénomènes météorologiques et leurs répercussions sur l'accessibilité au terrain. Il doit être capable d'orienter les déplacements et le positionnement des troupes sur le théâtre, en s'appuyant sur des modèles fiables d'analyse du terrain. Ces analyses peuvent porter sur des pays entiers comme sur un itinéraire clé.

Pendant l'opération, la vitesse de réaction du commandement doit être optimale. Les systèmes d'analyse et de traitement des informations à caractère spatial doivent réagir de manière instantanée et être capables d'intégrer de nouvelles acquisitions en temps réel.

Dans notre travail, il paraît impossible de réaliser un système idéal qui intégrerait tous les types de sources d'informations et les analyserait pour fournir un résultat immédiat et fiable à 100 %. Cependant, la formulation d'un indice de fiabilité, dépendant des données disponibles, est l'un de nos objectifs. Pour rendre ce système opérationnel, le temps de calcul doit également être pris en compte. Enfin, en réponse à des exigences à la fois prévisionnelles et opérationnelles du renseignement, l'évolution des facteurs de terrain, sous influence climatique, serait idéalement pré-calculée sous forme de fonction conditionnelle (de forme si... alors).

1.4. Les modèles de traficabilité

Tous secteurs d'application confondus, il existe deux types de modèles qui traitent de l'interaction entre le véhicule et le terrain sur lequel il évolue :

- des modèles de mobilité, dont l'objectif est de quantifier expérimentalement ou empiriquement tous les paramètres ayant une action sur la progression du véhicule. Tous les modèles développés, militaires ou civils font référence au NATO Reference Mobility Model (Haley, *et al.*, 1979; Ahlvin & Haley, 2001) ;
- des modèles de traficabilité, dont l'objectif est de quantifier spatialement tous les paramètres de terrain affectant la progression du véhicule. Ils font référence au Terrain Analysis Field Manual (US Army Field Manual, 1990), et sont adaptés selon les besoins spécifiques et/ou le domaine géographique étudié.

La mesure de mobilité repose sur la théorie de Bekker (1956). Le modèle de Bekker est un modèle phénoménologique qui consiste à estimer une capacité de traction (*drawbar pull*), résultat de la différence entre l'effort de traction et la somme des résistances à l'avancement provoquée par l'enfoncement du train de roulement d'un véhicule. Le premier terme est dérivé de la loi de Mohr-Coulomb, le second est estimé empiriquement à partir d'essais in situ à la plaque. Ce modèle est aussi largement utilisé dans l'étude de la mobilité d'engins robotisés (Gerhart, 2004 ; Patel *et al.*, 2004).

Les approches militaires des années 70 (NRMM) étaient destinées à prévoir les déplacements des véhicules, roulants et chenillés, sur des terrains boueux, partiellement gelés et relativement plats et homogènes. Les modèles se sont ensuite adaptés aux besoins du combat rapproché (CCTT) et au développement d'engins automatisés (ModSAF), tout en répondant aux nouvelles procédures de renseignement spatialisées (IPB, par exemple). La traficabilité militaire prend alors une dimension géographique. L'objectif des nouveaux systèmes (DTSS, Trafficability Analysis Engine) est alors de fournir un support opérationnel au commandement par le biais de cartes. Leur émergence est simultanée de la Guerre du Golfe et les systèmes sont logiquement optimisés pour cette région (grandes vallées, déserts à reliefs assez faibles). Aujourd'hui les systèmes développés sont opérationnels sur ce type de paysages, mais les zones de conflits se diversifient et les axes de recherche se dirigent vers l'intégration exhaustive de paramètres dynamiques.

L'approche civile, et notamment forestière, est en général plus conceptuelle. Les besoins exprimés par l'industrie minière et pétrolière sur l'accessibilité aux sites et le transport des ressources trouvent des réponses partielles dans des mesures géotechniques ponctuelles, qui posent le problème de leur représentation spatiale. Dans le domaine de l'environnement, certains projets ont bénéficié de fonds européens et sont inscrits dans une logique de développement à long terme (cas du projet GMES). Les solutions mises en place sont non seulement directement appliquées par les institutionnels, mais elles proposent également une adaptation du concept de traficabilité à des moyens civils courants.

1.4.1. Modèles militaires de traficabilité

L'« Intelligence Preparation of the Battlefield » (Figure 9), décrite dans les manuels militaires, est une procédure manuelle. Elle est réalisée par des officiers qualifiés, à partir de mesures géotechniques *in situ* et de cartes d'occupation des sols. Elle mobilise un temps d'interprétation considérable. En conséquence, les services de renseignement américains ont réactualisé ces concepts en y intégrant les avancées technologiques récentes (imagerie, SIG, lidar, Modèles Numériques de Terrain, radar,...). Dans le même temps, ils ont lancé des programmes d'analyse de terrain automatisés (Grindle *et al.*, 2004). Notons que la défense française s'intéresse également largement à des dispositifs de prises de décision opérationnelle (Marot *et al.*, 1997) basés sur l'analyse du terrain (PEA TOE et PEA ECORS de la Délégation Générale pour l'Armement ; Grandjean *et al.*, 2009) et l'environnement atmosphérique (PEA METEORE).

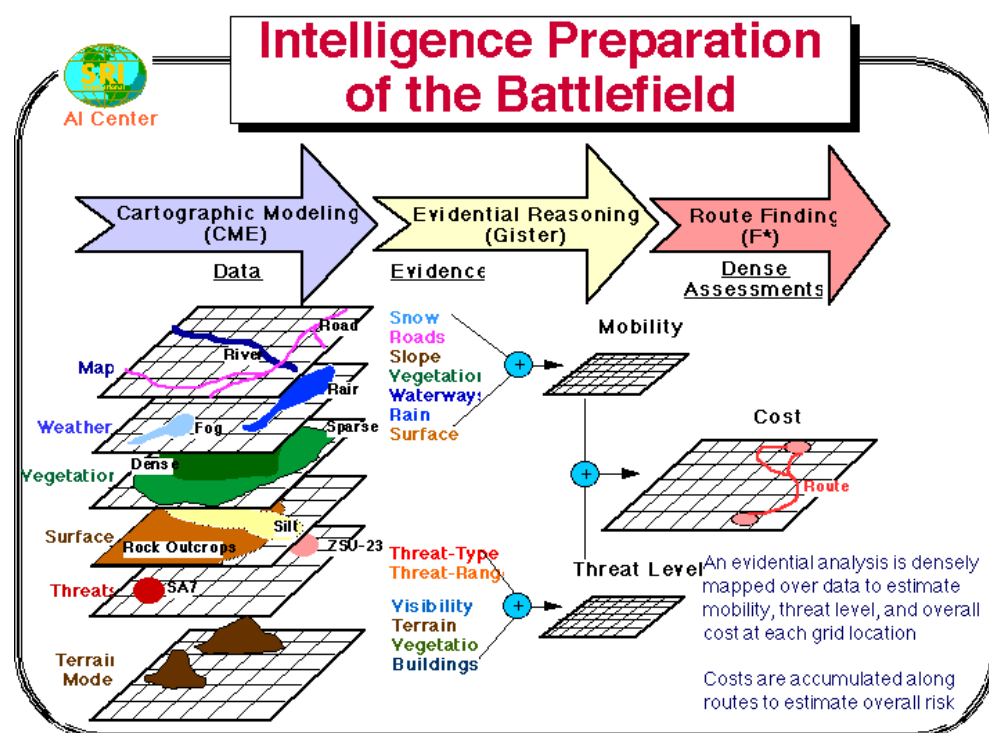


Figure 9 : L'IPB automatisé tel que modélisé par le Stanford Research Institute (SRI)
<http://www.ai.sri.com/~gister/ipb.html> (Lawrence, 1995)

Les modèles de mobilité prennent en compte les caractéristiques mécaniques des véhicules (puissance moteur, vitesse maximale, suspension,...), leurs dynamique (courbe d'accélération et décélération, capacité d'enlèvement) et les réactions du conducteur (visibilité, temps de réaction...) face à son environnement (Haley *et al.*, 1979 ; Ahlvin *et al.*, 2001). En conservant le concept du NATO Reference Mobility Model (NRMM), les expérimentations ont amélioré progressivement les simulations dynamiques en temps réel (Bustos *et al.*, 1995 ; Vong *et al.*, 1998 ; Benoit, 2002 ; Richmond *et al.*, 2005) et développé des outils pour des besoins spécifiques, notamment les différents types de véhicules automatisés (CCTT, WARSIM, OneSAF, NRMM II et III ; Birkel, 2003 ; Cummins *et al.*, 2006).

Le NRMM est un programme développé dans les années 70 par l'armée américaine (Haley *et al.*, 1979), pour répondre au besoin d'un modèle standard qui décrirait la mobilité des véhicules, tractés et chenillés, sur différents types de terrains. Dans sa première version,

le caractère très empirique du modèle ne donnait qu'une tendance et les utilisateurs devaient évaluer avec circonspection l'extrapolation des résultats à leur situation particulière. Modèle d'aide à la décision tactique (TDA), il formule des scénarii Go/NoGo à partir de plus de 200 paramètres liés aux véhicules, aux terrains et aux situations climatiques. Il dissocie également les contextes d'axe de circulation de et tout-terrain. Les transformations successives de la structure de ce modèle ont permis de l'intégrer dans un système de traficabilité dont il constitue la branche tactique (Feldman, 2000).

La plupart des modèles de simulation militaires intègrent des standards issus du NRMM :

- **Close Combat Tactical Trainer (CCTT)**
- **One Semi-Automated Forces, OneSAF** (Wittman & Harrison, 2001; Parsons, 2004)
- **Janus** (Hood, 2002)
- **CombatXXI** (Cary, 2005)

Parmi les modèles de traficabilité, le **Digital Topographic Support System DTSS** (Graff, 2003), développé par le service de topographie de l'armée américaine (U.S. Army Corps of Engineers Topographic Engineering Center, <http://www.tec.army.mil>), représente actuellement le système le plus abouti en analyse de terrain automatisée. Il intègre les paramètres statiques et dynamiques d'analyse de la traficabilité afin de délivrer, dans des délais très courts, tout un ensemble de cartes thématiques : mobilité, visibilité, rapport distance/temps par rapport à un point. Sur support ArcGIS, son concept méthodologique repose sur la représentation automatique du **Modified Combined Obstacle Overlay** ou MCOO (Figure 10).

Le **Moteur d'Analyse de Traficabilité** (Slocum *et al.*, 2003), développé à l'Académie Militaire américaine, est un système expert d'estimation matricielle de la mesure de traficabilité. Il intègre, par superposition, des modules géographiques pondérés, dans le but d'obtenir un gradient de cette estimation. Il utilise, comme le DTSS, le modèle MCOO pour déterminer les zones d'obstacles. L'image obtenue est une matrice de pixels auxquels un indice de traficabilité est associé, entre 0 (nogo) et 1 (go). Il n'intègre pas de fonction de variation climatique.

Si ces systèmes sont assurément les plus avancés opérationnellement, ils présentent des limites. Les zones désertiques, pour lesquelles sont optimisés leurs modèles, présentent le double avantage d'une faible variation de facteurs liés aux conditions climatiques et des analogues dans l'ouest américain, le désert du Mojave par exemple, où s'effectuent des ateliers expérimentaux d'estimation des paramètres (Hibbits & Gillespie, 2005).

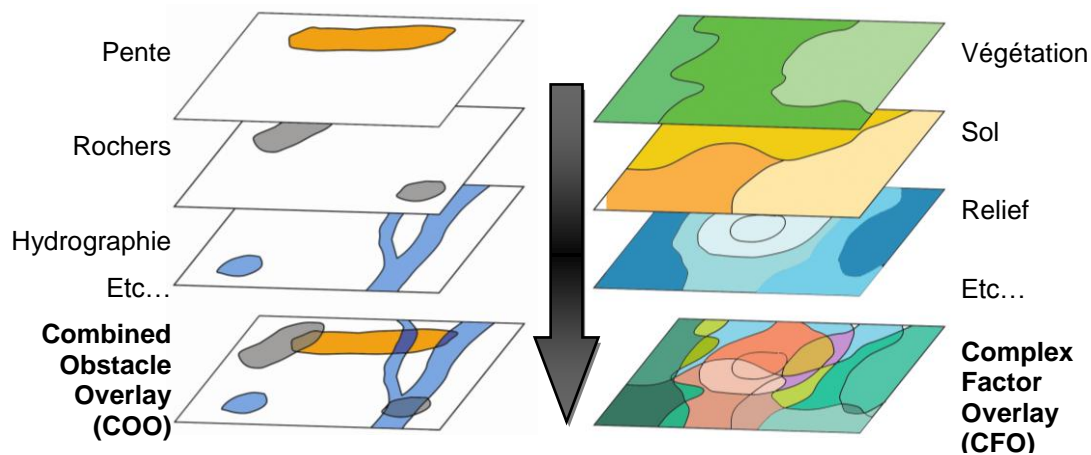


Figure 10 : Les principes des techniques de superposition de facteurs complexes (CFO) et d'obstacles combinés (COO), d'après Donlon et Forbus (1999), modifié.

Le MCOO est un produit de renseignement militaire dont la mission est d'identifier les obstacles, terrains clés, voies d'approches, couloirs d'engagements et lignes de champ de vision, à partir d'une analyse spatiale du terrain (COO). L'espace est ainsi divisé en trois qualifications : Go (ou Unrestricted, U), NoGo (ou Restricted R) et SlowGo (ou Severely restricted, SR). L'étendue de ces obstacles varie selon le type de véhicule considéré.

Le CFO effectue un découpage de l'espace en régions homogènes obtenu par la superposition de catégorie issues de l'analyse de terrain (végétation, sol, occupation du sol, topographie). Il est utilisé pour calculer une estimation contrainte sur les attributs de chaque catégorie, la vitesse maximale d'un véhicule, par exemple.

Enfin, la performance des modèles américains s'appuie sur un arsenal technique et humain absolument unique considérable bénéficiant de l'expérience d'hommes qualifiés en reconnaissance stratégique et de l'apport de travaux scientifiques spécifiques (Choset *et al.*, 2000 ; Grindle *et al.*, 2004). Ils nécessitent le soutien de toute une équipe de spécialistes, bien souvent à l'origine du programme.

Malgré ces facilités, Donlon et Forbus (1999) avaient remarqué le manque de lisibilité dans ces systèmes géographiques militaires : tous les résultats affichés sont uniquement sous forme quantitative, et difficiles à interpréter. Comment savoir dans quel cas le passage est possible si le coefficient de traficabilité est de 0.5 ? La lecture directe des interprétations rendrait plus efficace la décision. Ils avaient également proposé d'introduire l'intelligence artificielle pour anticiper des événements météorologiques. Mais aucun des modèles développés depuis, militaires ou civils, n'a repris ces idées.

1.4.2. Modèles civils de traficabilité

Les approches civiles développées par Suvinen *et al.* (2002) et Gumos (2005) pour l'estimation de la traficabilité, se sont concentrées sur l'aide à la décision (Figure 11).

Suvinen *et al.* (2002) adoptent les travaux de Saarilathi (2002). Ils considèrent la traficabilité (qu'ils appellent mobilité de terrain) comme une fonction de la capacité du sol à résister à des forces de roulement ou de traction (ou de pente). Ils traduisent ensuite ces forces comme une contrainte de mobilité, géographiquement organisée par l'algorithme de Cost Distance. Pour calculer cette contrainte, ils divisent le terrain en critères statiques et critères évolutifs.

Cost Distance = Surface distance x Vertical factor x ((Friction(a) x Horizontal factor(a) + Friction(b) x Horizontal factor(b))/2)

Où :

Vertical factor : forces de pente,

Horizontal factor(a) : inclinaison latérale

Horizontal factor(b) : somme des forces affectant le mouvement, sans direction particulière (dépendantes des facteurs du terrain)

Les forces de pente sont calculées par l'équation du plan incliné. La perte d'énergie est liée au sens d'approche du véhicule (il monte ou il descend) et à la pente du terrain. Si certains obstacles sont considérés comme dangereux, l'auteur préconise un coefficient de désavantage, à l'aplomb de ces obstacles (câbles électriques par exemple).

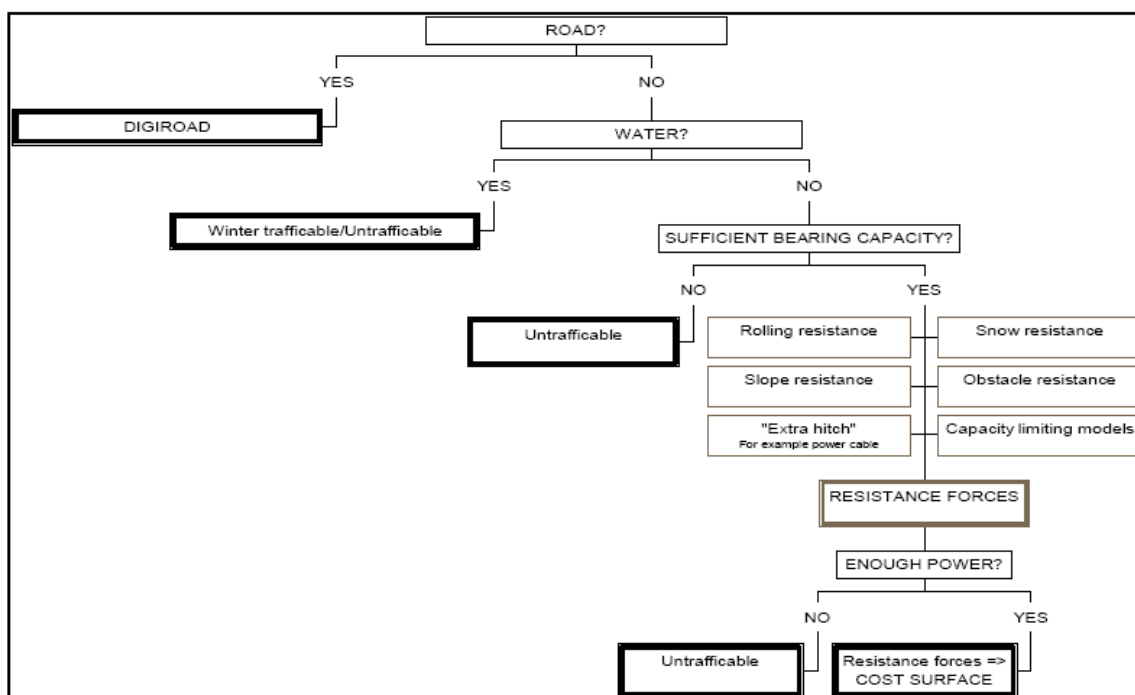


Figure 11 : Schéma décisionnel du modèle de traficabilité de Suvinen et al., 2002

La mobilité du véhicule est influencée par quatre critères évolutifs : la résistance de la neige (selon son épaisseur et de sa densité), la capacité du sol à supporter le passage d'un véhicule (décomposée en sols cohésifs et non cohésifs), la résistance au roulement et l'humidité du sol. Ces critères évoluent selon des tendances climatiques annuelles, mais peuvent subir, aux périodes d'équinoxe, des variations infra-journalières très importantes.

L'originalité et l'intérêt de cette étude se défendent par une approche décisionnelle booléenne basée, au départ, sur la présence d'une route. S'il n'y a pas de routes, alors le modèle recherche la présence de barrière hydrique, puis calcule la portance du sol. Cette approche requiert cependant une analyse et un suivi du terrain minutieux pour établir l'algorithme final. Rappelons que cette étude a pour cible le déplacement des tracteurs forestiers de Finlande.

Gumos (2005) constate que la plupart des approches pour caractériser la traficabilité superposent des facteurs de terrains sous format raster. Il propose alors de ramener le problème de traficabilité à un flux. Il élabore une démarche simplifiée (Figure 12) qui combine les données de sol avec une condition d'humidité du sol (sec, humide et saturé) pour calculer des gradients de résistance, dont le seuil est donné par la limite d'Atterberg. Il extrait du MNT le calcul du *Compound Topographic Index*, ou CTI (Burrough & McDonell, 1998), qui consiste à évaluer la contribution de la pente à l'accumulation de l'eau (également appelé Topographic Wetness Index).

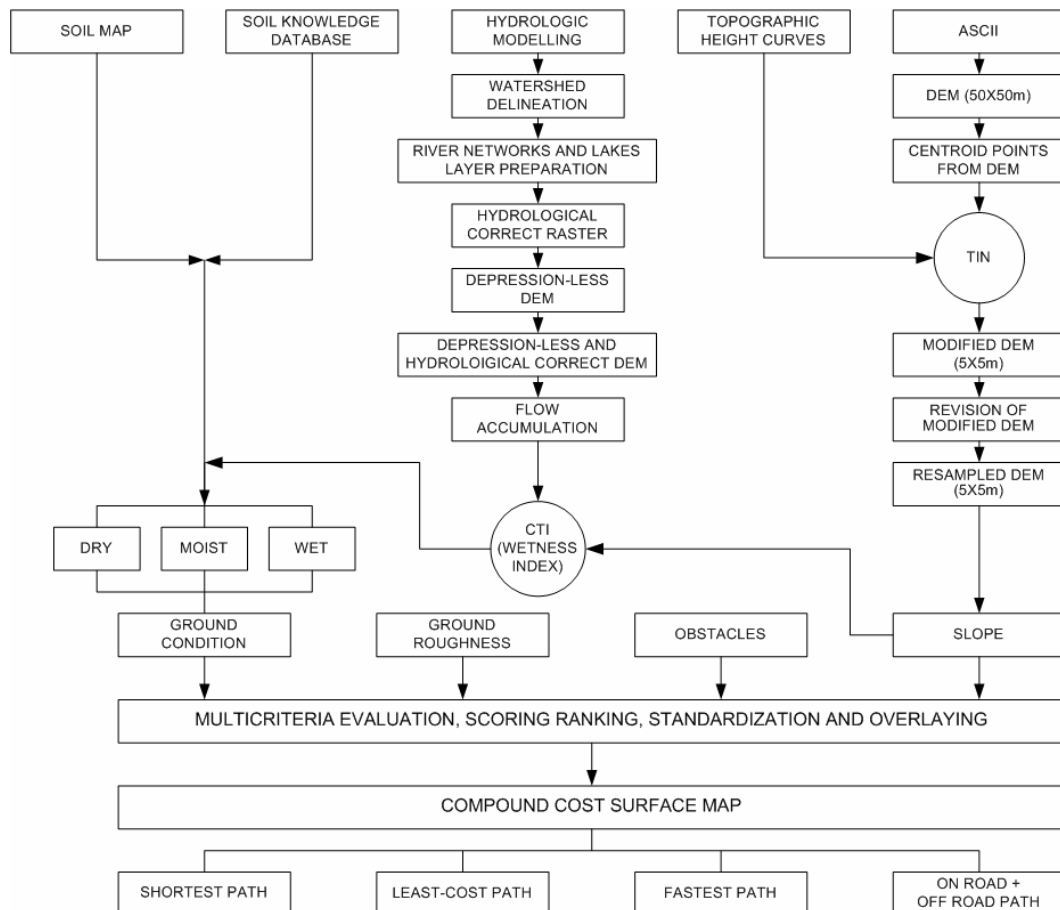


Figure 12 : Modèle de traficabilité tout-terrain, développé par Gumos, 2005

1.5. Synthèse du besoin et des contraintes opérationnelles

La problématique de traficabilité telle qu'elle est traitée dans la littérature répond à un besoin opérationnel, qu'il soit militaire ou civil. Les solutions développées ont donc privilégié une méthodologie en rapport avec les ressources et moyens techniques des commanditaires.

1.5.1. Contraintes liées à la problématique de traficabilité

Le caractère très simplifié des approches mises en place voile la complexité de l'étude de la problématique de traficabilité en contexte opérationnel. On peut organiser ces contraintes en quatre grands secteurs :

- l'inhérente complexité de l'interaction des phénomènes naturels (pédologiques et climatiques), mécaniques et humains. Ils influent sur le diagnostic de traficabilité en proportion impossible à quantifier. L'habileté du conducteur et sa capacité à optimiser le potentiel de son véhicule peuvent renverser un diagnostic en traversant des zones estimées impraticables par les calculs (Figure 13). La réduction de cette erreur est possible en conservant une homogénéité dans l'analyse des phénomènes observés, ce qui implique de fournir plusieurs échelles de diagnostic (et donc plusieurs diagnostics imbriqués) ;



Figure 13 : Exemple de franchissement rendu possible par l'habileté du chauffeur.

Rivière Guéra, 6 octobre 2007.

Il est certain que le diagnostic de traficabilité aurait fourni un avis négatif sur le franchissement de cette barrière hydrique en fin de saison des pluies. Mais avec plus d'un mètre d'eau, le chauffeur prend le risque de traverser, car il compte sur son habileté à suivre un radier, inondé mais capable de supporter le poids du véhicule et de ses passagers.

- la prise en compte du véhicule. Les capacités motrices et mécaniques du véhicule ne sont prises en compte, dans les modèles de mobilité, que par des expérimentations réalisées sur des véhicules tests (Haley *et al.*, 1979 ; Gerhart, 2004 ; Patel *et al.*, 2004). Parmi ces caractéristiques, seul l'enfoncement du véhicule est adapté à une restitution cartographique.

Cette contrainte a été adoptée dans la plupart des modèles de traficabilité (à l'exception du modèle de Suvinen *et al.* (2002) qui n'a pas d'objectif cartographique), mais ne rend pas totalement compte des capacités de mobilité et de franchissement des véhicules ;

- le niveau d'expertise requis dans le traitement des sources et l'analyse des informations pour l'élaboration d'un modèle d'estimation. Le caractère multidisciplinaire de la modélisation de la traficabilité peut justifier le traitement de chaque branche par un groupe d'experts, ce qui est le cas dans les grandes institutions, militaires notamment (France, Angleterre et Etats-Unis). Pour preuve, l'orientation de la modélisation selon la culture du domaine scientifique dont il est issu, agricole, géotechnique, physique ou géographique, est le biais le plus courant observé dans les travaux précédemment cités. En se plaçant du côté utilisateur et non développeur, la mise en place de l'étude se soucie de sa portée opérationnelle et de ses contraintes inhérentes ;
- les boucles expérimentation - modélisation – validation – retour d'expérience exigent des allers-retours sur le terrain à plusieurs phases de la construction de l'étude. Dans les projets militaires d'étude de traficabilité, cette boucle excède 3 ans et le retour d'expérience des troupes sur le terrain (tracks GPS, mesures, points d'observations) alimente ensuite le modèle sur plusieurs années. Un modèle ne peut donc pas être parfait à sa sortie, mais se bonifie avec le temps. La composante Surveillance Mondiale pour l'Environnement et la Sécurité de l'initiative européenne GMES, qui traite de la traficabilité, est également prévue sur une durée supérieure à 5 ans, avec des retours d'expériences relayés par des coopérations institutionnelles. Mais la plupart des travaux scientifiques et techniques n'ont pas un recul suffisant pour espérer une mise en place pérenne, même dans le secteur pour lesquels le modèle a été développé ;
- le caractère non générique de la problématique de traficabilité. Une carte de traficabilité est un produit d'aide à la décision, dédiée au domaine d'application et aux interlocuteurs pour lesquels elle a été conçue. Ce qui bloque l'idée d'une solution générique capable de s'adapter à différentes tâches. A l'inverse, les modèles issus du domaine scientifique ont développé des analyses généralistes qui aboutissent en sortie à des cartes d'analyses de paramètres (humidité du sol, franchissement, pente, densité végétale) qui ne sont pas directement utilisables. La difficulté résulte dans le dosage entre l'adaptabilité du modèle et le degré d'abstraction du produit opérationnel.

1.5.2. Contraintes de mise en place opérationnelle du modèle

La mise en place d'un système opérationnel suppose que le diagnostic de traficabilité soit établi comme un outil stratégique visant à cibler un résultat optimisé en fonction de contraintes de coût, de délais et de performances. Le modèle n'évolue pas techniquement sur un objectif de rendement. Cependant, la validité du diagnostic en temps réel implique que la durée de la procédure doit être réduite au maximum. Nos réflexions nous ont amené sur les investigations suivantes :

- l'analyse du terrain pour la problématique de traficabilité peut se décomposer en deux sous-ensembles : une identification de sa structure (relief, sol, sous-sol) et une étude de ses éléments évolutifs (végétation, hydrographie, humidité).

De ces deux sous-ensembles, seul le second requiert une mise à jour. Par conséquent, la constitution a priori d'un fond renseigné de la zone d'étude permet de réduire l'élaboration du diagnostic à la durée de la mise à jour des éléments évolutifs. Notons que les données de sol, sous-sol et relief peuvent évoluer simplement par l'amélioration dans le temps de leur résolution (SRTM passé de 90m à 30m par exemple) ou de leur qualité ;

- la démocratisation de l'information géographique disponible en sources ouvertes en ligne et l'apparition de nouveaux services et outils de diffusion de cette information (globes virtuels, mashup cartographiques) permettent aujourd'hui de construire cette base d'interprétation à moindre coût. En parallèle, la thématique du réchauffement climatique permet de récupérer les produits et modèles des institutions météorologiques américaines (NOAA et NASA), conceptualisés sur une base géographique et donc parfaitement compatibles avec les outils standard (ArcGIS, MapInfo...) ;
- le modèle doit intégrer la complexité du processus tout en s'appuyant sur des algorithmes de traitement de données efficaces, pour que l'information apparaisse limpide et décisive pour le décideur. Ce montage est périlleux car en limitant ses interventions, l'utilisateur ne contrôle pas l'intégralité du processus. Ce modèle est construit sur un support informatique courant, de manière à ce que des améliorations ou modifications soient facilement implémentables à moyen ou long terme ;
- enfin, le modèle n'est réellement opérationnel qu'à partir du moment où il a prouvé sa robustesse par une méthodologie reproductible sur plusieurs environnements et/ou secteurs géographiques, ainsi que sa fiabilité par le biais de missions de terrain validant les résultats obtenus. Le Tchad méridional pourrait être dans ce cas une zone d'étude idéale car elle concentre d'une part un grand nombre de paysages et une dynamique géoclimatique caractéristique des régions tropicales et, d'autre part, des opérations logistiques de grande envergure (humanitaires, militaires et pétrolières).

1.5.3. Limites et voies de progrès

Devant le développement de nouvelles technologies spatiales et le nombre croissant d'applications, les cinq dernières années furent riches en travaux d'actualisation du concept de traficabilité, pour lequel chacun explore des voies de recherche spécifiques.

Cependant, les limites de ces travaux sont perceptibles. Dans les secteurs civils, ils peinent souvent à sortir de la sphère recherche et à se convertir en systèmes opérationnels, même imparfaits. Aucun d'entre eux n'ambitionne de sortir au-delà des zones géographiques pour lesquelles il a été testé sur un terrain instrumenté. Les travaux militaires US supposent soit une exhaustivité du fond de renseignement fiable et complet, soit une mobilisation d'experts sur le terrain qui paraît démesurée pour des acteurs disposant de moins de ressources (soit par obligation comme les défenses européennes, soit par choix comme les acteurs industriels). Si on y ajoute la spécificité des zones tropicales (rarement testées dans les modèles classiques préférentiellement adaptés au désert et aux zones tempérées ou boréales), une approche originale, faisant intervenir d'autres sources de données, doit être trouvée.

2.1. Présentation des orientations méthodologiques

L'état de nos connaissances sur la traficabilité et le contexte actuel d'accès aux informations nous ont amené à prendre les choix méthodologiques suivants :

- la traficabilité est une problématique complexe, qui requiert de considérer un environnement à quatre dimensions. Une des options les plus favorables pour l'analyse et la représentation de cet environnement consiste à envisager la traficabilité comme le résultat des interactions de **paramètres géographiquement organisés**. Sa modélisation revient alors à traiter le problème de spatialisation de la résistance mécanique du sol et d'interprétation des éléments du paysage en paramètres quantitatifs influant sur la progression de véhicules ;
- la restitution cartographique à une échelle unique n'est pas satisfaisante pour rendre compte d'un diagnostic opérationnel de traficabilité. D'une part, certains obstacles (inondations, routes coupées, zones urbaines, cultures) peuvent provoquer un contournement très important (plusieurs centaines de kilomètres). D'autre part, les précipitations peuvent faire varier très localement les conditions d'humidité du sol. Nous proposons de construire un modèle à travers **trois échelles** d'analyses et de restitutions cartographiques de la traficabilité : globale, à l'échelle du pays ; régionale, avec un objectif de diagnostics à l'échelle du 250 000^e ; locale, avec un objectif de diagnostic à l'échelle du 20 000^e ;
- les éléments du paysage sont extraits de **l'imagerie satellitaire**, pour chacune des échelles de diagnostic. Il existe aujourd'hui un éventail de capteurs opérationnels (faible coût, capteurs fiables, nombreux algorithmes d'interprétation). L'utilisation de l'imagerie permet de pallier les difficultés d'accès sur le terrain. Le Tchad méridional est depuis plusieurs années une région de conflits et l'accès en est limité (hors N'Djamena) pour des missions scientifiques. Une méthodologie basée sur des données de calibration prises sur le terrain est donc exclue. Nous avons mis au point des chaînes de traitements spécifiques afin d'extraire ces éléments à partir d'un ensemble de capteurs multispectraux et radar ;
- le paysage du Tchad méridional est un environnement dynamique cyclique : aride en période de sécheresse (octobre à mai), la région est partiellement inondée et recouverte par la végétation sous les effets de la mousson africaine (juin à septembre), très irrégulière. Nous avons orienté notre approche sur **l'observation** et non la prédiction **des conséquences** de ce phénomène sur l'environnement. En effet, les modèles hydrologiques et météorologiques disponibles ne permettent pas de reproduire le caractère événementiel de cette évolution aux échelles régionales et locales. Les zones inondées et l'humidité à l'échelle locale seront restituées par imagerie radar issue de nouveaux capteurs à très haute résolution (THR) ;

- une **méthodologie ouverte**, dont la source elle-même ne serait pas le paramètre limitant. Les approches des auteurs analysés dans la bibliographie, quelque soit l'articulation méthodologique employée (booléenne, orientée objet, éléments finis), se heurtent dans la pratique à des carences de sources d'acquisition. Le choix des paramètres à estimer dépend alors directement des sources disponibles pour l'étude qui devient « source-oriented ». Les sources d'entrée de notre modèle ont, pour la plupart, une portée mondiale. Cette orientation permet ainsi d'étendre potentiellement le modèle sur de très nombreuses zones géographiques.

Ces orientations méthodologiques respectent les contraintes opérationnelles (portée de la méthode, robustesse, coût, délai de traitement) ainsi que les contraintes géographiques (faible niveau de renseignement cartographique, dynamique climatique, incapacité d'accès au terrain) de l'étude.

2.2. Structure du modèle d'estimation

Notre modèle d'estimation de traficabilité repose sur la combinaison de trois couches de renseignements dynamiques (Figure 14) :

- **une couche de praticabilité des axes routiers.** Le diagnostic de praticabilité est le résultat d'un arbre de décision qui inclut les variables d'état et de revêtement de la route, ainsi que les précipitations surfaciques journalières. La variable d'état est issue de données de sources ouvertes. Lorsque aucune information n'existe ou n'a été trouvée, l'état de la route est par défaut considéré comme dégradé (cette considération part du principe qu'une route entretenue ou récente a fait l'objet d'un financement et, par conséquent, que l'information sur ce financement est accessible). La variable de revêtement est issue de l'observation par imagerie THR et de sources ouvertes. La géométrie du réseau est obtenue par différents processus, selon l'échelle de restitution ;
- **une couche de résistance à la pénétration au cône.** La répartition spatiale des types de sols est extraite des images par un processus de classification, à partir de leurs caractéristiques granulométriques, de leur teneur en argile et en particulier en kaolinite. Ces valeurs sont calibrées et interprétées à partir des informations issues des cartes et bases de données pédologiques. Les valeurs de résistance à la pénétration au cône sont calculées en fonction du type de sol et de la teneur en eau pondérale. L'augmentation de la résistance provoquée par la densité de racines s'ajoute à celle du sol pour constituer une valeur de résistance « **tout-terrain** » ;
- **une couche d'obstacles.** Chaque type d'obstacle fait l'objet d'un processus de traitement spécifique (zones urbaines, relief, hydrographique, végétal). Ils sont extraits des sources d'imagerie ;

Ces couches d'informations sont ensuite combinées pour fournir une carte de traficabilité spécifique d'un type de véhicule.

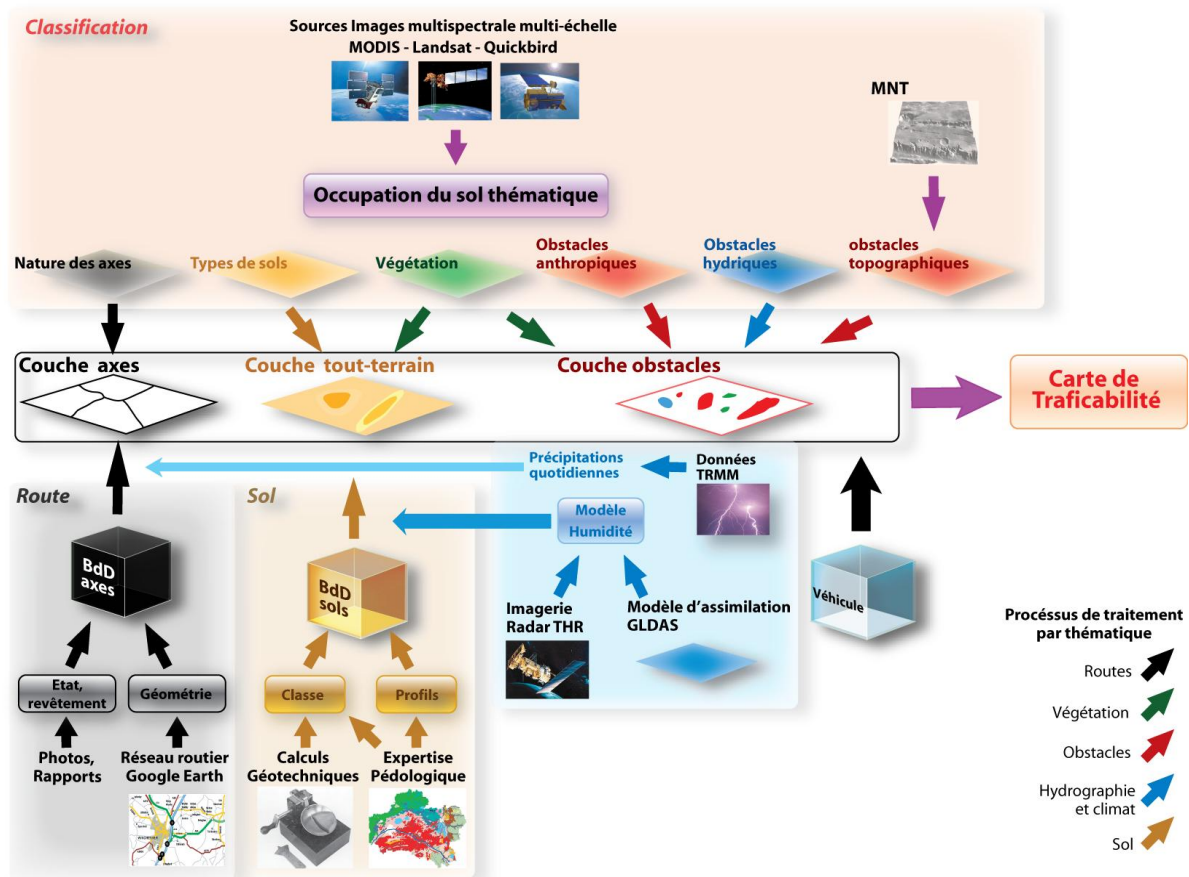


Figure 14 : Représentation schématique du modèle d'estimation de traficabilité

La représentation du modèle d'estimation de traficabilité est volontairement simplifiée pour ne faire apparaître que les processus majeurs. Les trois échelles de restitution cartographique sont regroupées en une seule car elles suivent la même logique de production. Les produits raster d'humidité du sol et de précipitations sont combinés d'une part avec la base de données « axes » pour générer une couche dynamique de praticabilité de la route, et d'autre part avec la base de données sol pour la spatialisation de la résistance à la pénétration au cône.

2.2.1. Sources de données

Le modèle d'estimation de traficabilité compte deux niveaux de sources de données :

- des **sources globales**, qui couvrent toutes les zones du globe. Les chaînes de traitement que nous avons mises en place pour interpréter ces sources sont théoriquement transposables à toutes les zones du globe ;
- des **sources locales**, qui fournissent des informations qualitatives et quantitatives de terrain, mais dépendent de paramètres de diffusion spécifiques. Elles apportent, par exemple, des renseignements sur les travaux routiers, des vues sur les embourbements en saison des pluies, les étendues des inondations, la pédologie...

Globales ou locales, ces sources sont de natures très diverses (images, photographies, cartes, textes, bases de données). Chaque échelle de restitution du diagnostic fait appel à un ensemble spécifique. Ces ensembles ont été définis à partir d'un ensemble initial de sources potentielles. Les jeux définitifs et optimisés ont été constitués sur une base de critères techniques, de coût et de pérennité.

2.2.1.1. Sources globales

Les sources globales sont essentiellement issues de produits satellitaires. Utilisés conjointement, ils permettent de produire une analyse correspondant à une résolution donnée. Cette résolution est variable, en général inférieure d'un facteur 2 à 3 à la résolution du capteur utilisé, 15-30m pour Landsat à 250m pour le MODIS (cf annexe 2). Elle correspond à une moyenne de l'énergie réfléchie ou rétrodiffusée sur une aire donnée, et non à la taille des objets identifiables au sol.

L'humidité des sols est apportée aux échelles globale et régionale du diagnostic par les produits du modèle d'assimilation GLDAS. Opérationnel depuis 2004, ce modèle intègre les données de plusieurs missions (TRMM, MODIS, AMSR-E,...) pour fournir, en quasi temps-réel (moins de 24h de décalage), une grille d'humidité des sols toutes les 3 heures à 0,25° de résolution spatiale sur l'ensemble des régions tropicales. Ces données, intégralement publiques, sont construites par un algorithme robuste et validé sur le long terme (Rodell *et al.*, 2004).

Les données de précipitations sont calculées à partir des données du capteur radar du satellite TRMM (Figure 15). Mis en service en 2003, il constitue la source actuelle la plus fiable pour l'estimation du taux de précipitation (Dubreuil *et al.*, 2007). Ces données sont disponibles en ligne sur les serveurs de la NASA, toutes les 3 heures, à une résolution de 20km (Huffman *et al.*, 2007).

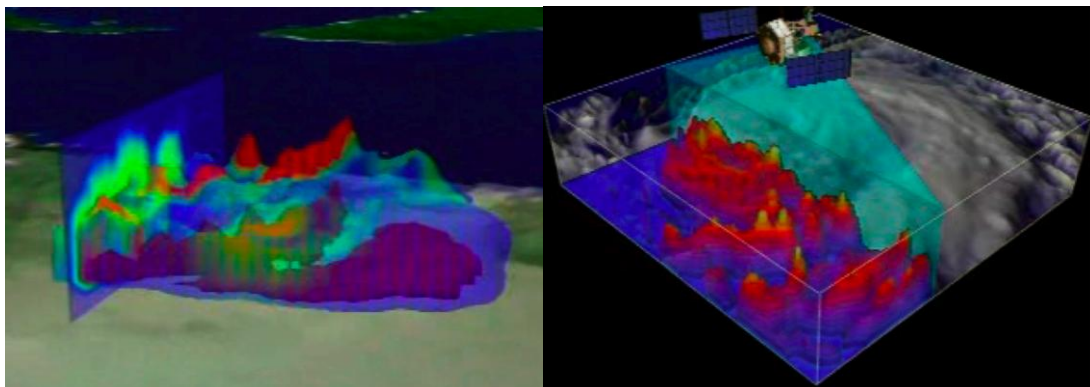


Figure 15 : Enregistrements des volumes et de la densité de nuages par le satellite TRMM

Le satellite TRMM est équipé de 4 instruments indépendants, qui couvrent les longueurs d'ondes du visible au radar. Il est ainsi capable de représenter le volume d'eau disponible dans l'atmosphère en 3D. Sa répétitivité est de 92,5 minutes (Nasa ; 2008).

Les obstacles sont extraits de l'occupation du sol interprétée à l'échelle régionale à partir de capteurs optiques multispectraux et du seuillage de MNT :

- les différents types de sols, les zones urbaines, et les barrières hydriques sont extraits des images du capteur Landsat 7 ETM+, à une résolution de 30m. Les images que nous utilisons sont des archives, acquises entre 2000 et 2002, qui couvrent l'intégralité des terres émergées et sont mises à disposition gratuitement sur le serveur de l'USGS. Le programme LDCM (Landsat Data Continuity Mission) poursuivra cette mission à partir de 2012 en proposant des images de mêmes caractéristiques, ce qui garantira la pérennité des méthodes d'interprétations que nous avons développées. Les zones urbaines et les barrières hydriques sont interprétées comme des obstacles infranchissables, sans condition. La végétation ne

devient obstacle qu'au delà d'un certain seuil. Pour l'apprécier, les caractéristiques liées à la végétation (croissance, densité, zones arborées) sont interprétées à partir des produits NDVI et EVI dérivés des images du capteur MODIS, calculés tous les 16 jours. ;

- le degré de pente est extrait des MNT SRTM. Nous avons considéré qu'une pente supérieure à 20% constituait un obstacle. Cette valeur se retrouve dans la majorité des modèles de mobilité et de traficabilité (Birkel, 2003). Notons que cette valeur est rarement rencontrée sur notre zone d'étude, particulièrement plane.

La géométrie du réseau routier des zones africaines est digitalisée depuis Google Earth, en suivant les tracés vectoriels produits par la communauté d'utilisateurs internautes. Les attributs d'état et de revêtement proviennent de nos observations, et de l'analyse de sources ouvertes documentaires (Figure 16).

2.2.1.2. Sources locales

Les sources locales sont interprétées pour produire une restitution cartographique de la mesure de traficabilité à l'échelle locale. Nous avons également testé le potentiel des capteurs radar THR TerraSAR-X et Cosmo-Skymed pour l'estimation de l'humidité du sol pour assurer une mesure cohérente à cette échelle.

2.2.1.2.1. Informations disponibles en sources ouvertes

A l'échelle locale, l'occupation du sol est interprétée à partir des compositions colorées du capteur Quickbird : classes de végétation et de sols, barrières hydriques, bâtiments. Nous avons orienté cette analyse sur les sources d'imagerie Quickbird disponibles sur le globe virtuel Google Earth. Leur rôle ne se limite pas à apporter un diagnostic local et précis de traficabilité, mais également à effectuer un contrôle de validation de l'analyse moyenne résolution par des prises de vues plus récentes et mieux résolues. Elles permettent ainsi d'apprécier les évolutions du paysage (cultures, niveau des fleuves, extension et période de crues et d'inondations).

Le choix de s'appuyer sur les images disponibles sur globes virtuels permet d'optimiser l'usage de sources de qualité facilement accessibles. Elles appartiennent donc au domaine des « sources ouvertes ». Le terme de « sources ouvertes » a des significations multiples. Il est initialement réservé au domaine militaire, qui l'oppose aux sources dites « fermées », confidentielles. Dans les communautés de développeurs informatiques une autre signification a émergé liant la notion implicite de gratuité aux « open sources », ce qui génère l'erreur de penser que toutes les sources ouvertes sont libres, c'est à dire dépourvues de copyright (ou copyleft). Ce n'est pas le cas.

Au-delà des images déjà mentionnées, il nous paraît essentiel de tirer parti de l'ensemble des sources accessibles (en ligne ou hors ligne) quelle que soit leur origine (scientifique, commerciale, administrations, médias, société civile, ...), considérées comme des sources ouvertes. Le fait de les prendre en compte se fait néanmoins en respectant les copyrights des auteurs ou détenteurs de droits. Lorsque ces sources sont payantes (sous forme directe ou indirecte), le coût est analysé à l'aune de l'apport de la source.

Au niveau méthodologique, nous avons développé une typologie des sources ouvertes (Figure 16). Nous avons ensuite appliqué cette démarche à la problématique de traficabilité. Les sources analysées se divisent en deux grands groupes :

- les ressources géographiques. Elles rassemblent les informations issues des globes virtuels (images satellites, photos, vidéos...), les produits raster issus des modèles climatiques et météorologiques, les cartes et les données hébergées via un support cartographique de type Google Map (réseau routier vecteur, photos et vidéos géoréférencées) ;
- les ressources non géographiques. Ce sont toutes les sources d'origine textuelle issues des blogs, forums, actualités, rapports officiels, presse. Elles apportent une actualisation des sources géographiques sur un thème précis (trajet, route, site touristique).

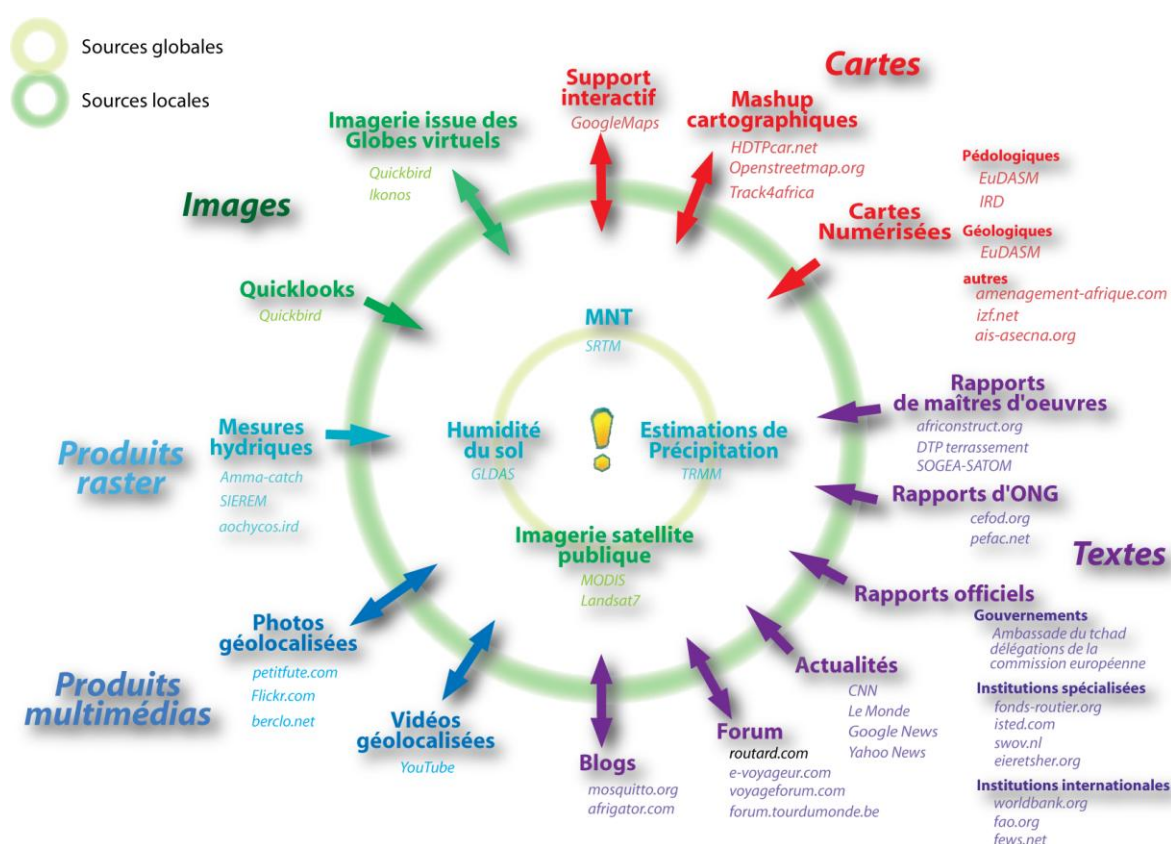


Figure 16 : Typologie des sources ouvertes en lignes utilisée dans le modèle d'estimation de traficabilité

Les sources globales (cercle central) sont très peu nombreuses et se récupèrent par le biais d'outils de sélection et de visualisation en ligne permettant d'accéder très rapidement au produit recherché. Ceci constitue une différence majeure avec l'acquisition des sources locales (cercle extérieur), dont la phase de recherche peut être fastidieuse. Ces dernières se regroupent en sources brutes (moitié gauche du graphique) et analysées (moitié droite). Les flèches à double sens mettent en évidence les sources de données collaboratives, avec lesquelles on crée une interaction. Elles s'opposent aux sources à partir desquelles on ne fait que récupérer de l'information (flèches en sens unique). Les sources présentées sur ce schéma ne font pas apparaître les serveurs de données et services car ils représentent un moyen d'accès aux sources et non la source elle-même.

Ces sources d'informations thématiques sont accessibles sur des supports extrêmement divers. Les technologies du web 2.0 ont favorisé l'émergence de nouveaux supports alimentés par les communautés d'internautes. Ils exploitent ainsi une sorte d'intelligence collective active (qui se conçoit par la mise en commun de connaissances et de compétences dans un objectif de construire un projet qui seul n'aurait pas été envisageable, par exemple Google Map Maker, OpenStreetMap ou Track4Africa) ou passive, via des systèmes d'aggrégateurs de contenu.

En parallèle de ces technologies, se sont développés de grands projets institutionnels de globalisation des informations thématiques (Tableau 1). Ces projets sont soutenus par une base scientifique solide et ont une vocation de service, à destination de la communauté. Certains d'entre eux associent un globe virtuel pour permettre à l'utilisateur de visualiser les données ainsi traitées. Cependant, pour l'instant, ces services ne sont pas encore tous opérationnels.

Serveur	Données	Date des données	Format	Disponibilité du service
SERVIR Africa	Inondations, risques aléas de catastrophes naturelles (tremblement de terre, tsunamis), infos climatologiques	1961-1991 (mensuelles)	Raster & vecteurs	09 / 2009*
GlobalLandCover	Carte OCS	2008	Raster	2008
HydroSHEDs	Réseau hydrographique	2000	Vecteur	2007
HORIZON IRD	Cartes, rapports, articles	1950-présent	Scans	2005
Geonetwork FAO	Toutes les cartes produites par la FAO	1995	Raster & vecteurs	2005
Geonames World Gazetteer	Toponymie	/	Ponctuels	2007
Reliefweb	Cartes de risques de traficabilité, inondations	2005-présent	Pdf	2005
LogisticsClusters	Projets routiers	1995	Texte	10/2008
Crop Explorer	Cartes de ressources en eau	2006-présent	Raster	2008
GobalSoilmap	Cartes pédologiques	/	Raster	Fin 2009*
AfricaSoils.net	Cartes pédologiques	?	Raster	Fin 2009*
Groads	Réseau routier	?	Vecteur	Fin 2009*

Tableau 1 : Liste des projets et services globaux thématiques, en rapport avec la problématique de traficabilité

Nota : les astérisques marquent des dates prévisionnelles, annoncées par les fournisseurs des services

2.2.1.2.2. Imagerie radar à Très Haute Résolution

Le lancement de deux nouveaux systèmes d'observation radar à Très Haute Résolution à partir de 2007 (Terra-SAR X et COSMO-SkyMed) offre l'opportunité de cartographier les zones inondées à une résolution métrique. Cette échelle de travail, est comparable en théorie à celle du capteur optique Quickbird (Scheuchl *et al.*, 2009 ; Mason *et al.*, 2009), mais ne permet cependant pas une restitution de l'occupation du sol aussi exhaustive. L'imagerie Quickbird disponible sur Google Earth a été utilisée ici en tant que support visuel pour l'interprétation des patches de niveaux de gris de l'imagerie radar.

Des images du capteur Terra-SAR X ont été mises à notre disposition sur nos zones d'intérêt, programmées dans le cadre d'un projet opérationnel de la société Géo212 qui a accueilli nos travaux de thèse. De ce fait, même si nous n'avons pas défini les paramètres de prise de vue, nous avons pu les tester dans plusieurs configurations possibles (polarisation, incidence, mode d'acquisition, conditions d'humidité), afin de déterminer la meilleure sensibilité par rapport à l'humidité des sols. Ces images ont été acquises pendant les saisons sèches et humides 2008.

2.2.2. Méthodes de traitement et d'interprétation

2.2.2.1. Chaînes de traitements d'image

Les algorithmes utilisés pour l'interprétation d'images reposent sur des formulations mathématiques destinées à discriminer un maximum d'informations à partir des propriétés physiques de l'image elle-même et de l'organisation spatiale des objets sur ces images. Ces algorithmes, empruntés à différents domaines (imagerie médicale, data mining, bio-informatique, intelligence artificielle), sont généralement spécifiques à une source, un élément et un type de résultat recherché (booléen, image, vecteurs). Les équations dérivées de la logique floue, de la recherche sémantique, des machines à vecteurs de support, des réseaux de neurones et des transformées en ondelettes figurent parmi les techniques les plus performantes pour l'interprétation d'image satellitaires.

Les chaînes de traitement d'image que nous avons mis au point ciblent l'interprétation de paramètres d'occupation du sol, en maximisant l'efficacité des algorithmes. Ces processus ont été implémentés sur le logiciel ArcGIS pour le traitement de l'imagerie optique et ENVI pour le traitement de l'imagerie radar. La souplesse d'utilisation de ces deux logiciels a permis d'une part de paramétrer et de tester un très grand nombre d'algorithmes pour sélectionner le plus performant, et d'autre part de développer un bloc de traitement opérationnel pour la cartographie de la traficabilité à l'échelle régionale. Ces chaînes de traitement se divisent en trois groupes :

- l'interprétation des images à moyenne et basse résolution Landsat et MODIS se base sur une analyse des paramètres d'occupation du sol selon leurs propriétés spectrales. Chaque type de paramètres est ainsi extrait par une chaîne de traitement spécifique, que nous avons optimisée en raccourcissant le temps de calcul et les résultats les moins performants (Figure 17). Ces processus ne font intervenir l'utilisateur qu'à l'initiation de l'interprétation (apprentissage). L'optimisation de ces chaînes et la qualification des résultats sont présentées au chapitre 4 ;

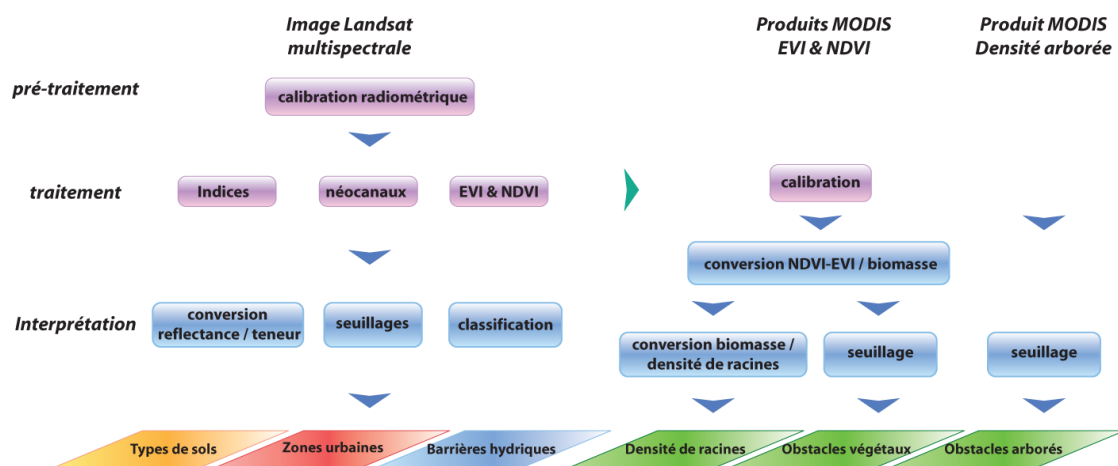


Figure 17 : Chaîne de traitement de l'imagerie multispectrale Landsat et MODIS

Les reconnaissances des types de sols, zones urbaines et barrières hydriques sont, pour l'échelle régionale des diagnostics, extraites uniquement de l'imagerie Landsat. Les produits EVI et NDVI MODIS sont calibrés à partir de l'imagerie Landsat, pour une date identique. Cette chaîne est entièrement automatique.

- l'interprétation des compositions colorées Quickbird est réalisée à partir de deux chaînes de traitements, que nous avons paramétrées et combinées sous conditions (Figure 18). La première chaîne segmente l'image en polygones, qu'elle classe ensuite à partir de leurs critères de formes, de couleurs et de textures. La seconde chaîne discrimine les groupes de pixels de l'image en définissant le meilleur hyperplan entre eux. Par cette méthode, nous conservons les meilleurs résultats par thème d'occupation du sol. Le détail de ces analyses est présenté au chapitre 4 ;

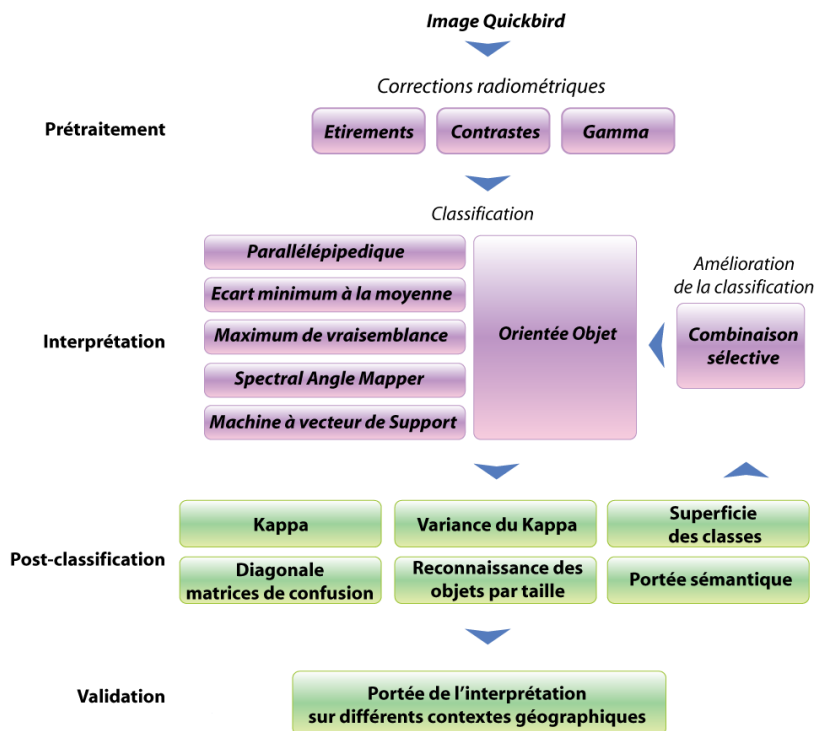


Figure 18 : Chaîne de traitement de l'imagerie Quickbird

L'interprétation de tous les éléments de l'occupation du sol par imagerie Quickbird est réalisée en un seul processus de classification. La combinaison sélective consiste à ne conserver que les meilleurs résultats, quelles que soient les classes d'objets reconnus. Le processus de traitement est ensuite reporté sur une dizaine de paysages types du Tchad méridional.

- le traitement des images radar nécessite plusieurs étapes de filtrages et de correction radiométrique (Figure 19). Ces capteurs étant nouveaux et la littérature correspondante étant limitée, nous avons donc mis au point une série de fonctions afin d'extraire les surfaces éligibles pour la conversion du signal en valeur d'humidité. Seules sont retenues les surfaces de sols nus, non labourés.

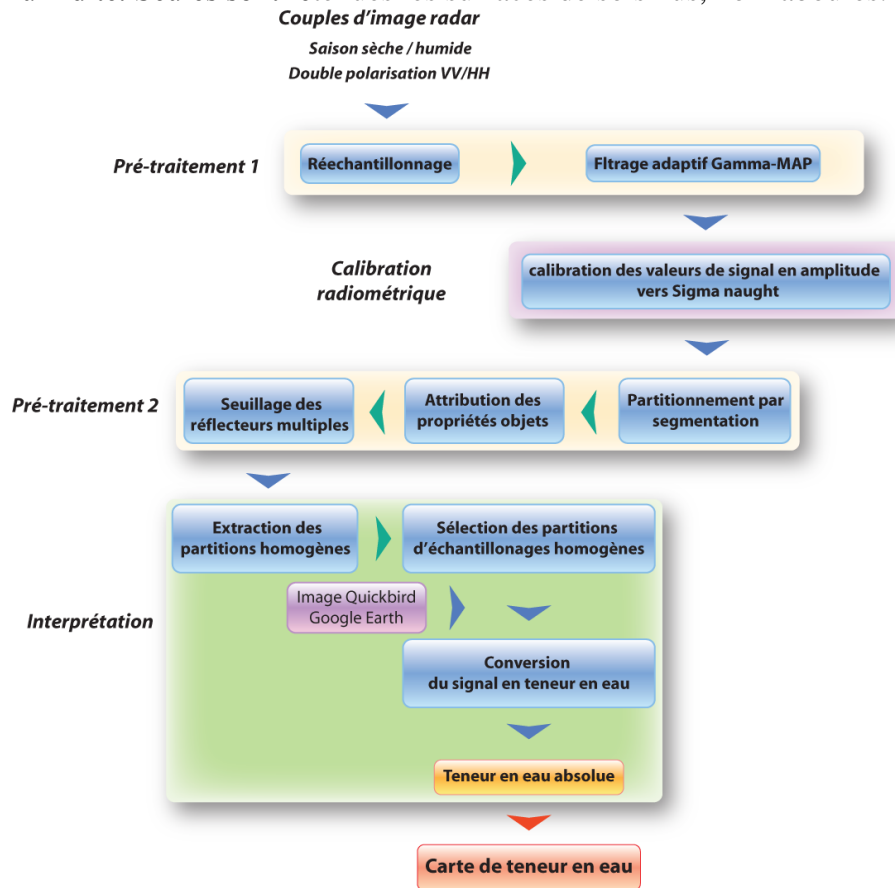


Figure 19 : Chaîne de traitement d'image radar mise au point dans l'étude.

Cette chaîne de traitement requiert de nombreuses interventions de l'expert tout au long du processus (paramètres et types de filtrage, valeurs de seuillage, choix de la meilleure configuration, sélection des zones d'échantillonnage). Elle intègre les sources Quickbird en tant que vérité terrain pour valider visuellement l'homogénéité des zones d'échantillonnage. La carte de teneur en eau ne concerne alors que les zones sélectionnées à la fin de la deuxième phase de pré-traitement. Le rééchantillonnage de l'image radar n'est réalisé que lorsque le couple d'images radar n'est pas à une résolution identique. On procède alors à un sous-échantillonnage de l'image la plus résolue par agrégation. Ce processus n'est toutefois envisagé que pour des images dont le mode d'acquisition est identique (stripmap ou spotlight). La différence de résolution entre les deux images est alors d'un facteur 2.

2.2.2.2. Chaîne de traitement des produits d'humidité et de praticabilité

Le traitement des produits d'humidité GLDAS a pour objectif de produire une cartographie de la teneur en eau pondérale au pas de 90m à partir des valeurs de teneur en eau volumiques, exprimées au pas de résolution de 25 km. Ce processus est obtenu à partir de la spatialisatation du poids volumique des sols, que nous avons calculé par traitement de l'imagerie Landsat (Figure 20).

Nous ne faisons pas intervenir le Topographic Wetness Index (Beven et Kirkby, 1979) de manière systématique pour redistribuer les valeurs d'humidité. Certaines hypothèses sur lesquelles il est fondé (notamment celle de débit continu) perdent leur validité dans les environnements à très faible dénivelé (Zhang et Montgomery, 1994 ; Kokkila, 2002), de type plaine d'inondation. Son intégration dans la production de diagnostics de régions à fort dénivelé est discuté dans le chapitre 5.

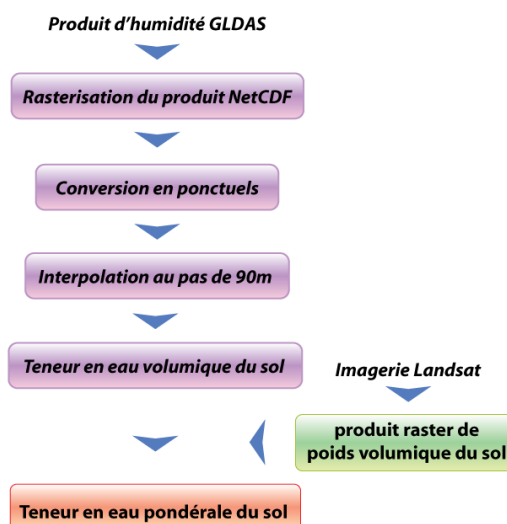


Figure 20 : Chaîne de traitement des produits d'humidité GLDAS

Nous avons conservé le pas de temps des produits GLDAS de 3h. Ce processus étant entièrement automatique, le calcul de la teneur en eau pondérale est très rapide. On peut ainsi suivre l'évolution de l'humidité au cours d'une journée et produire les diagnostics de traficabilité tout-terrain correspondants.

Les estimations trihoraires de précipitations du capteur TRMM (nommés par l'acronyme 3B-42) sont produites en temps réel au pas de 20km (Kongoli *et al.*, 2007, Vila *et al.*, 2007). Elles combinent les mesures radar de cinq instruments météorologiques (TMI, TCI, SSM/I, AMSR-E et AMSU-B) pour ajuster les estimations infrarouges des satellites météorologiques (GOES, NOAA, MSG ; NASA, 2008). La comparaison de ces produits avec des stations au sol ont montré d'une part une très bonne corrélation avec les mesures pluviométriques, et, d'autre part, une correcte reproduction des régime saisonniers (Dubreuil *et al.*, 2007 ; Huffman & Bolvin, 2009).

L'intégration de ces données requiert une phase de pré-traitement que nous avons automatisé. Les précipitations cumulées sont ensuite calculées à partir des estimations trihoraires, puis intersectées avec le réseau routier. La carte de praticabilité est obtenue par reclassification du réseau et des hauteurs de précipitations journalières (Figure 21), par un arbre de décision dichotomique.

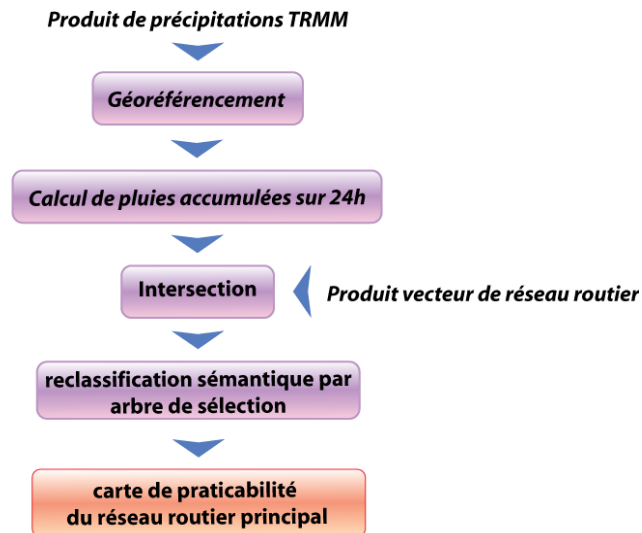


Figure 21 : Chaîne de traitement des produits de précipitation TRMM

2.2.2.3. Constitution d'une base statique et mise à jour dynamique

La mesure de traficabilité est le résultat d'une estimation dynamique. La complexité des traitements nous a amené à réfléchir à une construction logique du modèle permettant de disposer à l'avance des informations pérennes et réduisant le temps de traitement de la mise à jour. Il se décompose en une base statique autour de laquelle s'articule une partie dynamique (Figure 14).

La base statique constitue l'ensemble des informations issues des données d'archives. Elle contient d'une part, un fond cartographique regroupant les informations d'occupation du sol et d'autre part, la base de données pédologiques. Sur cette base viennent se greffer des informations climatologiques et les informations de mise à jour. La base de données routières est constituée au départ de données d'archives (géométrie, revêtement et état), puis mise à jour régulièrement à chaque fin de saison des pluies.

Le fond cartographique est un fond raster, extrait de l'imagerie satellitaire par des techniques de classification (cf 2.2.1.). La base de données sol renseigne chaque type de sol, reconnu à partir de leurs propriétés multispectrales, en caractéristiques géotechniques. La construction de cette base est présentée au chapitre 3. La base de données routières rassemble les caractéristiques d'états pérennes (dégradation d'usure) et événementielles (dégradation instantanée lié à une crue), ainsi que le revêtement des routes principales.

La mise à jour du modèle concerne les données de précipitations et d'humidité des sols. Elles sont calculées quotidiennement à partir des estimations à 3h. La température du sol et de l'air, l'humidité de l'air, le flux radiatif et les vents n'interviennent qu'indirectement dans le diagnostic et ne seront pas détaillés dans cette étude. La valeur de résistance à la pénétration au cône est calculée en fonction de l'humidité et du type de sol (cf. chapitre 4-4). Le diagnostic de praticabilité de la route est prononcé à partir de l'accumulation des précipitations sur 24h.

2.2.3. *Boucles de validation*

La mesure de traficabilité est qualifiée par deux critères :

- une évaluation de la qualité a priori des classifications par le biais de méthodes statistiques (matrice de confusion, kappa, mesure de séparabilité des clusters) ou par corrélation par rapport à des sources de références (profils pédologiques, photographies, imagerie Quickbird). Dans notre définition de la traficabilité, chaque élément de l'occupation du sol est associé à une caractéristique sémantique. Les techniques post-classifications ne traitant pas ce critère, nous avons construit un coefficient sémantique pour calculer la « gravité » des erreurs de confusion lors de la classification des images Quickbird (cf. chapitre 4) ;

- une analyse de portée des processus de traitement sur les paysages du Tchad méridional. La production initiale du diagnostic est menée sur la plaine de Laiï. Elle est ensuite reportée sur la région d'Adré, dans l'Ouaddaï, et au centre du Salamat. Chacune de ces trois zones est représentative d'un type de paysage du Tchad méridional.

La méthode ainsi que le diagnostic de traficabilité seront validés par les retours d'expérience des acteurs de terrain en 2010.

2.3. Représentation des diagnostics de traficabilité

Le diagnostic de traficabilité est produit pour une date et un véhicule spécifique. Il se présente sous forme cartographique. Destiné à apporter une aide à la décision et non la décision elle-même, nous avons préféré le représenter par un produit cartographie en trois couleurs, plutôt que par une trajectoire, résultat de la conversion de valeurs quantitatives en indice qualitatifs. Cette carte permet ainsi une lecture directe et simplifiée des zones à emprunter et à éviter. La légende des cartes de praticabilité du réseau routier est identique à celle du tout-terrain :

- la couleur verte correspond à une traficabilité ne posant pas de problème particulier, soit 25% au delà de la limite de résistance de pénétration au cône par rapport à la pression exercée par le véhicule sur le sol. Une route entretenue bitumée ou bétonnée est également restituée par cette couleur car elle présente une bonne praticabilité. La plupart des terrains argilo-sableux en saison sèche et sableux en saison humide appartiennent à cette catégorie ;
- la couleur orange correspond à une traficabilité délicate, pouvant causer un ralentissement, soit entre 25 % et la limite de résistance de pénétration au cône par rapport à la pression exercée par le véhicule sur le sol. Les routes dégradées ou bétonnées mais sous de fortes pluies (>20mm jour) sont considérées comme des routes difficilement praticables. En saison humide, les terrains sablo-argileux et sablo-limoneux sont représentés en orange ;
- la couleur rouge correspond à une traficabilité mauvaise à impossible. Tous les obstacles (hydriques, végétation, anthropiques) sont en rouge, ainsi que les terrains dont la résistance de pénétration au cône est en dessous de la pression exercée par le véhicule sur le sol (argileux et argilo-sableux). Les routes dégradées ou non revêtues sous fortes pluies sont impraticables.

Etude du sol du Tchad méridional et de son environnement

La base de connaissance du modèle de traficabilité se structure autour de l'étude du sol et de son environnement. Nous l'avons décomposée en :

- une étude de **la nature du sol** en tant que système isolé. Son objectif est d'identifier les sols afin de les regrouper selon la classification USCS/LPC. Cette identification est réalisée à partir de paramètres pédologiques, physiques, chimiques et géotechniques. Chaque classe regroupe des sols au comportement mécanique proche ;
- une étude de la **répartition des sols** sur la zone d'étude et de la **variabilité spatiale de leurs phases solide et liquide**. La constitution de la phase solide découle de la genèse du sol, sous l'action combinée de facteurs climatiques, géologiques et topographiques. Les processus de pédogénèse, lithodépandants, caractérisent la transformation temporelle du sol. Ils sont considérés dans notre problématique comme un état stable final. La variabilité spatiale de la phase liquide que le sol contient découle de sa dynamique. Elle se distingue de la phase solide par son caractère transitoire, son évolution étant rapide (de la journée à la saison).

Le Tchad méridional occupe 500 000 km². Il est limité au nord par le 13° parallèle. Dans cette zone, les problèmes de traficabilité s'intensifient pendant la saison des pluies. Elle provoque la dégradation mécanique des sols et l'inondation de grandes zones dépressionnaires. L'intensité et la durée de ces phénomènes ne se répartissent pas uniformément sur le territoire tchadien. Ils requièrent alors une caractérisation à quatre dimensions de l'analyse des paramètres du système sol et de son environnement.

Nous présenterons dans ce chapitre une étude du relief et de la géologie, pour comprendre la répartition spatiale des sols et la variabilité de leur évolution sur le territoire du Tchad méridional. Nous avons par ailleurs réalisé une analyse détaillée des marqueurs climatiques (date de déclenchement des pluies, durée/intensité, régularité) de la saison des pluies pour tenter de prévoir son comportement et ses répercussions sur la dégradation des conditions de circulations. Les corrélations entre les données pédologiques et la classification LPC/USCS des sols sont établies en fin de chapitre. Elles constituent la première étape dans la spatialisation de la mesure de résistance à la pénétration au cône.

3.1. Organisation des structures du relief tchadien

L'impact direct du relief sur la traficabilité au Tchad Sud est limité aux escarpements rocheux localisés sur les bordures du bassin, dans les massifs de l'Ouadaï et du Mayo Kebbi (Figure 22). Ils sont matérialisés par des falaises de modelés gréseux tabulaires, des inselbergs ou des pitons rocheux. A l'intérieur du bassin, le relief est très plat. Sa morphologie rend compte de la répartition de certains sols ferrugineux exondés ou argileux à trace d'hydromorphie, de la présence d'anciennes cuirasses ou d'altérites. Son analyse permet davantage d'identifier la répartition géomorphologique de la plupart des sols que de localiser les obstacles au franchissement.

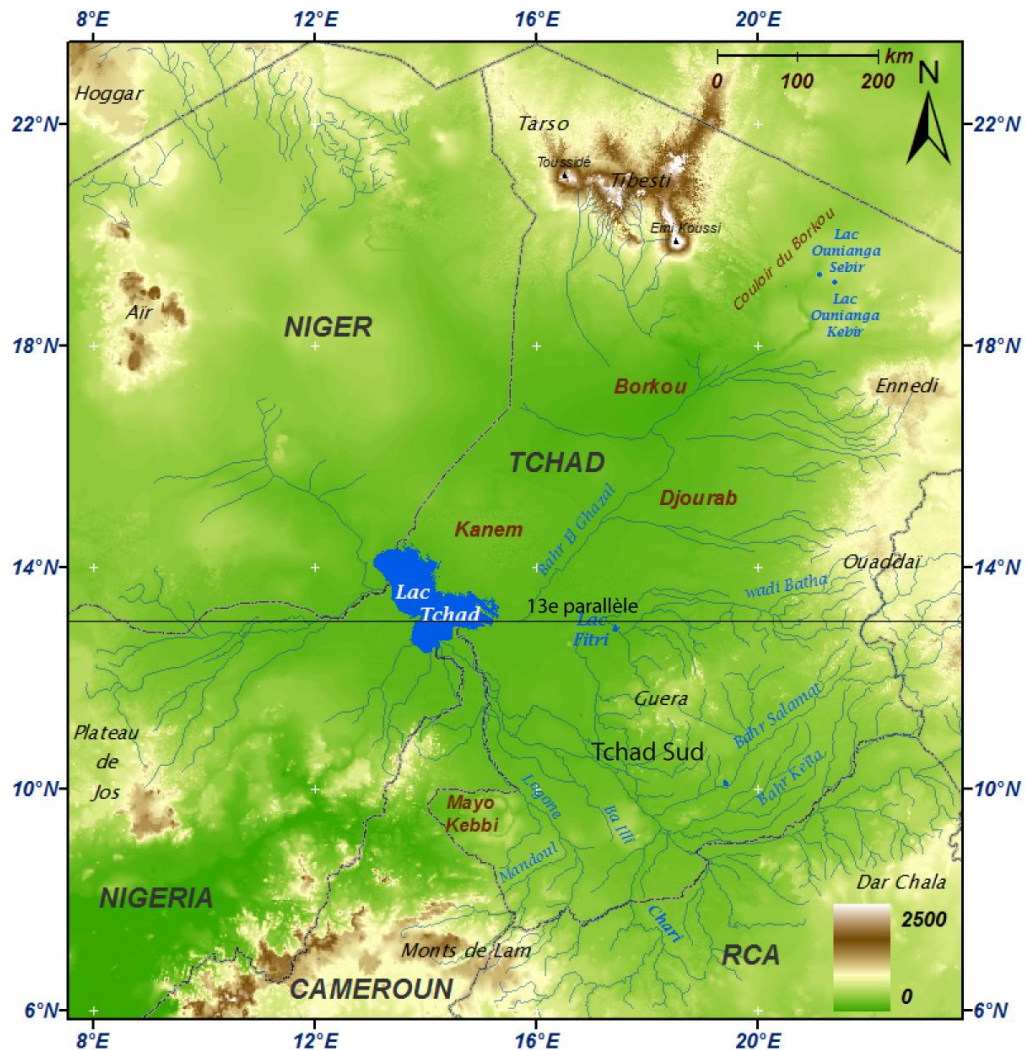


Figure 22 : Relief général du bassin tchadien et principaux cours d'eau
(fond topographique issu des données SRTM)

Le bassin du lac Tchad couvre 2 400 000 km², dont le Tchad n'occupe que la moitié orientale. Il s'étend entre les plateaux volcaniques de Jos au Nigéria et l'Aïr au Niger à l'ouest, le Hoggar au nord-ouest, le massif du Tibesti au nord, les plateaux granitiques de l'Ennedi et de l'Ouaddaï à l'est, les inselbergs des monts de Lam du Cameroun et du massif de Dar Chala au Sud. Il forme une dépression topographique en cuvette occupée au centre par le lac Tchad. Le Chari, unique fleuve permanent de la cuvette, irrigue les plaines du sud avec ses affluents principaux, le Logone, le Bahr Salamat, le Mandoul et le Ba Illi, qui, sous l'action de la mousson africaine, débordent et se déversent dans une vaste plaine d'inondation pour toute la durée de la saison humide. Dans les zones dépressionnaires du Bahr Salamat et du Moyen Chari, les rivières se déversent sur des glacis d'accumulation à très faible pente (Logone, Ba Illi).

3.1.1. L'Ouaddaï

La bordure orientale du bassin se relève progressivement en glacis faiblement inclinés jusqu'aux massifs cristallins de l'Ouaddaï, culminant à 1200 m (Riser, 1999). Les glacis d'accumulation sont plus ou moins indurés ou recouverts de formations dunaires au nord et à l'est du lac Tchad. Ils passent progressivement vers l'est à des glacis d'érosion faiblement couverts, puis découverts, à la périphérie des massifs (Pias, 1970). Les ensembles cristallins se dressent brutalement en inselberg au-dessus des glacis (Fabre, 1983). Les oueds qui constituent des dépressions argileuses à fond plat se remplissent en saison des pluies et se déversent en cours d'eau torrentiel sur les pentes déclives occidentales.

Les reliefs émoussés de l'Ouaddaï sont contrôlés par la fracturation du socle cristallin (Gsell & Sonnet., 1959), élargie en talwegs sous l'effet de l'érosion. Les versants aplanis et plateaux sont recouverts d'une fine couche d'altérites sableuses, favorisant un ruissellement actif pendant la mousson africaine (Mahé et L'Hôte, 1994). Les pistes de la région traversent nombre de ces talwegs secs d'octobre à avril. Gonflés par les fortes pluies de mousson durant la saison humide, ils deviennent infranchissables.



*Figure 23 : Axe Abéché-N'Djaména, donnant sur les inselbergs de l'Ouaddaï
(cliché : archetypes sur FlickrR, 15km à l'ouest d'Abéché, 13°46'N-20°42'E)*

Les premiers contreforts granitiques de l'Ouaddaï émergent de la couverture sédimentaire du bassin par de gigantesques inselbergs. La route latéritique terrassée se prolonge jusqu'à Oum Hadjer puis passe à une piste sableuse.

3.1.2. Le Tchad méridional

Au centre du Tchad Sud, le massif granitique du Guera représente le seul relief important du bassin. Séparé de la bordure méridionale par le bassin de Doba, il se dresse au dessus des plaines du Chari en un ensemble d'inselbergs et de pitons rocheux aux flancs escarpés, culminant à 1600 m (Mahamat *et al.*, 2006). Ils sont séparés les uns des autres par une vaste pénéplaine d'altitude moyenne de 300 à 500 m, inondée en période humide.

Le complexe fluvial soudanais du Chari qui draine le massif du Guera, alimente le lac Tchad par le sud. Il draine, avec ses affluents, toute la région méridionale de la cuvette (Daget et Itis, 1965). Le fleuve Chari traverse la région de faible déclivité des bas plateaux des Koros qui s'étend au nord jusqu'à Laï, entre 450 et 600 m d'altitude (Sonet, 1963). Ces unités géomorphologiques composées de sols rouges sableux ferrugineux en surface sont caractérisées par l'absence de nappe phréatique peu profonde. Elles forment des petites buttes peu accentuées culminant généralement à 70 ou 100 m au-dessus du niveau général.

Les pentes sont douces (Figure 24) et entaillées de vallées sèches bien marquées et peu nombreuses (Bouteyre, 1965). Ces reliefs restent émergés quelle que soit l'intensité des précipitations. Dans sa partie aval, le fleuve s'étend sur une plaine alluviale de 200 000 km² (Welcome, 1975) au relief uniformément plat (0,008 % de pente en moyenne). A son embouchure avec le lac Tchad, le Chari a construit une succession de deltas sableux en suivant l'évolution du déplacement du rivage depuis le Pléistocène (Pias, 1967).

A l'ouest, le Logone alimente en permanence le Chari depuis les inselbergs granitiques des Monts de Lam, au Cameroun. Il s'écoule au pied des cuirasses ferrugineuses du Mayo Kebbi (Mahamat *et al.*, 2006). Celles-ci constituent un escarpement peu élevé (une vingtaine de mètres) mais cependant infranchissable par les véhicules motorisés (Golvang-Bayo & Taher, 2006). Plus en aval, le Logone, gonflé des pluies de mousson précoces (mars-avril), déborde et se déverse dans une dépression à faible déclivité vers le nord. Toute la région située entre le fleuve et ses affluents est ainsi inondée et impraticable.

A l'est, les Bahr Salamat et Bahr Keïta, à sec d'octobre à mai, forment une vaste zone marécageuse en saison des pluies. Elle se structure en une alternance de bandes de terrains inondées et exondées.

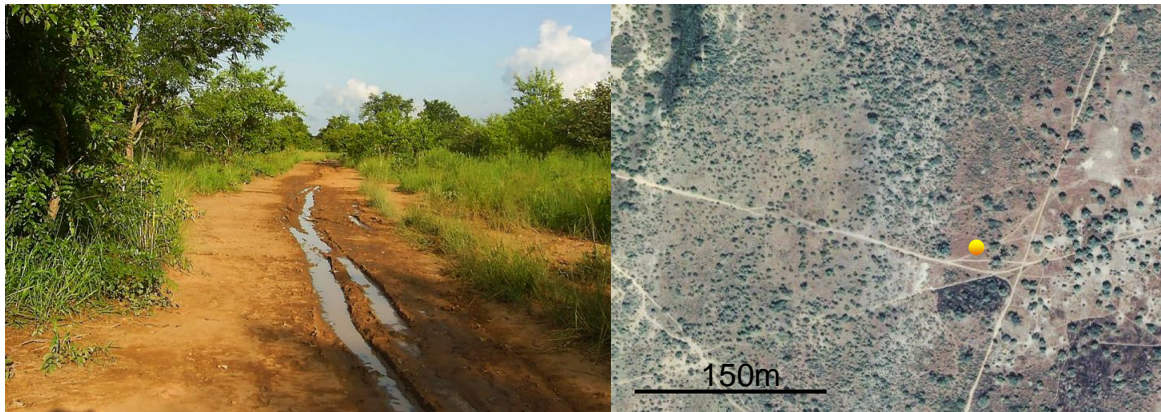


Figure 24 : Sommet de Koro à l'approche du village de Moussedan, et localisation sur imagerie IKONOS

(Cliché de Percy Carboneyro- Panoramio et imagerie Google Earth)

Sur la rive orientale du Chari, à 2 km au sud-est de Moïssala (17°47'05''E 8°19'49''N) le 24 octobre 2005, l'eau résiduelle stagnait dans les ornières de la piste alors que ses accotements étaient asséchés.

Sur la zone du Tchad méridional, à l'exception des pitons rocheux de l'Ouaddaï ou du massif du Guéra, les impacts du relief dans la problématique de traficabilité sont négligeables. En revanche, la présence d'un micro-relief (blocs rocheux, talwegs, tranchées, accotements surélevés) peut occasionner des erreurs dans la production du diagnostic à l'échelle locale. Il n'existe cependant aucune technique de mesure à distance opérationnelle pour traiter ce problème : la résolution des MNT actuels est trop faible pour garantir l'exhaustivité de détection des micro-reliefs (SRTM, DTED2) et les techniques lidar sont trop onéreuses. La génération systématique de MNT par le couple radar TerraSAR-X – TANDEM-X sera dans le futur une solution possible.

3.2. Géologie du bassin tchadien

3.2.1. Le socle précambrien des régions du Mayo Kebbi, du Guéra et de l'Ouaddaï

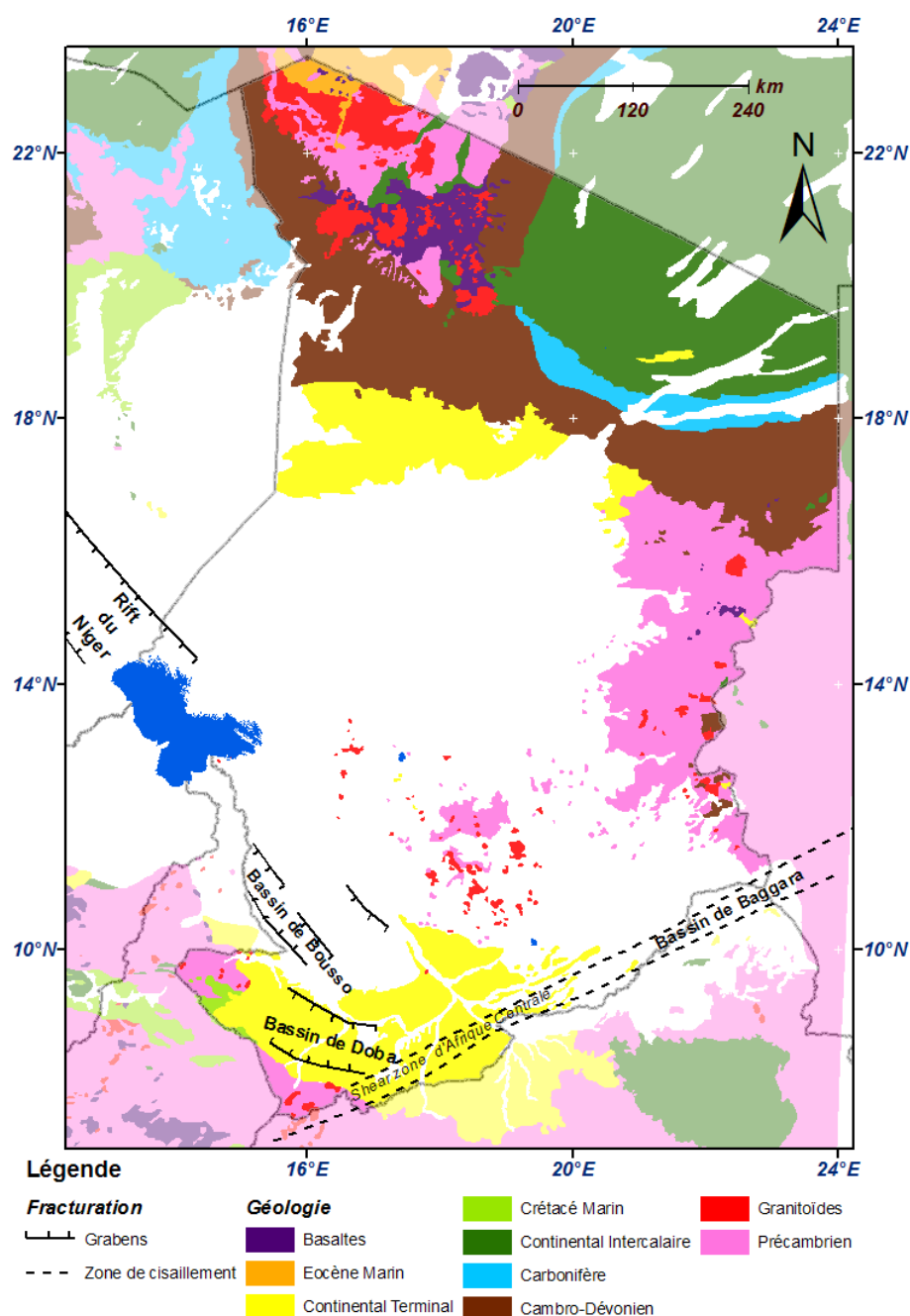


Figure 25 : Carte géologique simplifiée des formations anté-oligocènes, à partir des travaux de Pias (1967), Louis (1970) et Riser (1999).

La très grande majorité des sols du Tchad méridional est issue des alluvions quaternaires des fleuves Chari, Niger et Bénoué, ainsi que des colluvions du continental terminal. Les principaux fleuves actuels empruntent les structures profondes réactivées au Crétacé. Les alternances transgressives et régressives du lac Tchad ont structuré la couverture superficielle du bassin par des phases de pédogénèses et de dépôts. Le partitionnement de ces processus par les conditions climatiques et hydrologiques a alors façonné le paysage actuel.

Le substratum du bassin tchadien est constitué d'une série archéenne métamorphique, attribuée aux orogénèses éburnéenne et libérienne (Vidal, 2004), dans laquelle s'intercalent trois ensembles de granitoïdes calco-alcalins (Penaye *et al.*, 2006). A la différence des évolutions géomorphologiques du socle d'Afrique de l'Ouest, le socle n'a pas évolué en cuirasses ferrugineuses au Tchad. Cela s'explique par l'indépendance des variations morpho-climatiques du Quaternaire lié aux glaciations vis à vis du drainage constant et ancien des rivières alimentant le lac Tchad (Olivry *et al.*, 1996). Dans les régions les plus méridionales, l'alternance des périodes d'altération et de morphogénèse durant les cycles glaciaires et interglaciaires a successivement déblayé, aplani puis recouvert le socle rocheux d'un glaciais (Raunet, 2003).

Dans la région du Mayo Kebbi, ce glaciais ne dépasse pas 1 à 2 m d'épaisseur (Raunet, 2003). Il évolue dans la plaine du Logone vers un glaciais colluvionnaire pouvant atteindre 10 à 20 m d'épaisseur (Pouclet *et al.*, 2006). En progressant dans le bassin, ces sols peu évolués (ou régosols) s'imprègnent des conditions hydromorphiques de la plaine alluviale.

Le massif du Guéra n'a conservé que de rares reliquats gneissiques de la série archéenne métamorphique, dans sa partie nord-ouest, recoupés par des granodiorites porphyriques et monzodiorites post-collisions (Guiraud, 1985). Les affleurements de socle cristallin occupent des surfaces restreintes, généralement sous forme d'inselbergs, ou de dyke de microgranites (Tilho, 1948). Des éboulis graveleux recouverts d'une végétation arbustive reposent sur les versants, auxquels succède un glaciais arénitique de faible étendue. Vers l'est, jusqu'aux piedmonts du massif de l'Ouaddaï, les produits d'altérations du socle cristallin composent un sol squelettique de piedmont, essentiellement sableux, à tendance halomorphique dans les dépressions et oueds asséchés (Pias, 1967). Au sud et à l'ouest, ces sols de piedmonts dominent une vaste plaine cuirassée entaillée par les cours d'eau et des dépressions végétalisées. Le bassin du lac Fitri est recouvert de sols ferrugineux hydromorphes à vertiques.

Le massif de l'Ouaddaï est composé de granitoïdes, connectés génétiquement à ceux du Guéra. Ce socle cristallin pénéplané se présente comme un plateau d'altitude (Riser, 1999). Il est séparé de la bordure méridionale du bassin par le couloir de cisaillement dextre d'Afrique Centrale et le bassin de Baggara, orientée ENE – WSW (Raunet, 2003). Il se prolonge au nord par le massif gréseux de l'Ennedi et, à l'ouest, par de vastes plaines de piedmont couvertes de regs incultes aux sols halomorphes lessivés. A l'intérieur du massif, les glaciais colluvionnaires surmontent une arène issue de la dégradation du socle cristallin siliceux. La nappe phréatique peu profonde (2 à 3 m) donne un caractère hydromorphe aux fonds argileux des vallées où coulent des oueds intermittents (Massuel, 2001). L'aridité croissante de la région depuis le Pléistocène surimpose au caractère ferrugineux de ces sols hydromorphes des tâches et horizons discontinus brun-rouges subarides.

3.2.2. La couverture sédimentaire

La couverture sédimentaire occupe tout le bassin tchadien, à l'exception des massifs du Guéra et de l'Ouaddaï, et de la bordure du Mayo Kebbi. C'est au cours du Tertiaire que la cuvette tchadienne s'individualise et va acquérir sa forme actuelle (Mathieu, 1983). L'exondation des terrains s'accompagne de mouvements tectoniques compressifs qui ferment définitivement les bassins de Doba et de Bousso (Pias, 1960 ; Wolff *et al.*, 1964).

Le drainage du lac Tchad par le fleuve Chari est amorcé par ces grandes discontinuités, alignées dans cet axe NW-SE. A l'est, la fermeture du bassin de Bagarra fournit un axe de faiblesse occupé par la dépression du Salamat. Le Sahara est alors recouvert par une forêt équatoriale (Rognon, 1994).

L'évolution continentale du bassin tchadien se poursuit avec les dépôts sablo-gréseux à interstratifications d'argilites du Continental terminal (Wacrenier, 1962). Les conditions climatiques équatoriales vont favoriser la formation d'épaisses cuirasses ferrugineuses, qui affleurent sur la rive gauche de la partie amont du Logone et dans le nord du Salamat. Leur lithomarge constitue les sols ferrugineux de la région des Koros.

Au Quaternaire, le lac Tchad va connaître quatre cycles de transgressions et régressions. A l'Holocène moyen, il atteindra son maximum avec une surface de 340 000 km² (Leblanc *et al.*, 2006). A chaque transgression, le Chari développe un delta à son embouchure (Pias, 1967). Stabilisé par un seuil hydraulique, il se déversait dans le fleuve Niger par la Bénoué. Les phases de régressions sont responsables de la formation des ergs sableux au nord du bassin. Du fait de cette alternance de séries de dépôts fluviaux et éoliens, les formations du Quaternaire recouvrent environ 75% des terrains du bassin et sont divisées en sept séries de dépôts :

- une **série remaniée ancienne de sols ferrugineux rouges colluvionnaires**, obtenus par lessivage des cuirasses latéritiques et de leurs lithomarges argileuses. Ce sont des sables grossiers à quartz anguleux qui composent les buttes de Koros, les glacis du Haut Logone et du Mayo-Kebbi et la plaine du Salamat ;
- une **série fluvio-lacustre ancienne argilo-sableuse à nodule calcaire** couvrant tout le bassin du Logone-Chari au nord des Koros et à cailloutis sur les piedmonts de l'Ouadaï. La fraction argileuse est constituée par un mélange de kaolinite, de montmorillonite et d'illite ;
- une **série sableuse** récente, à faciès grossier localisée dans la partie aval du Logone-Chari et à faciès fin à quartz dominant et fraction micacée. La fraction argileuse est constituée de kaolinite et de montmorillonite ;
- une **série lacustre récente argileuse**, gris-noir à gris-beige en profondeur et épaisse d'environ 1 m à 1,5 m, qui correspond à un faciès de grande plaine marécageuse. Elle recouvre l'ancienne série ferrugineuse dans les plaines d'inondation du Salamat du Logone et dans la dépression de Masséna ;
- un **cordon sableux** d'une dizaine de mètres de haut qui s'étire de Bongor à Koro-Toro. Il marque l'extension maximale du lac Tchad ;
- une **série fluviale** subactuelle peu étendue, constituée des **bourrelets sableux** des cours du Chari, Logone, Bar Illi, Batha... et de leurs défluent récents (Bahr Erguig au nord de N'Djamena) ;
- les **formations lacustres actuelles** localisées dans les trois lacs principaux, Tchad, Fitri et Iro. Les sédiments sont gris-noir à bleutés dans des niveaux très réduits, argilo-sableux en surface à argileux en profondeur. La fraction argileuse est à dominante de montmorillonite et kaolinite.

3.3. Paramètres climatologiques du Tchad méridional

Le climat tropical du Tchad méridional est régi par les déplacements de la mousson africaine. Au nord, les précipitations inférieures à 100 mm par an caractérisent un climat désertique. Au sud, les 1 000 mm de pluies annuelles et l'air saturé d'humidité définissent un climat équatorial. Le Tchad méridional est situé dans le Sahel, zone de transition entre ces deux extrêmes. Son climat est caractérisé par une alternance annuelle plus ou moins régulière entre une saison aride, dominée par les vents du nord-est et une saison humide, dominée par le flux de mousson (Figure 26).

Les conditions de traficabilité se dégradent pendant la saison des pluies. La prévision de son déroulement constitue un élément important dans l'établissement des diagnostics de traficabilité. Nous avons donc étudié les paramètres de la saison des pluies (durée, intensité, date de début et de fin de saison, migration, pluies précoces), à partir de données climatiques d'archives, d'imagerie satellitaire basse résolution et de mesures climatologiques actuelles (2004-2008).

La mesure de traficabilité ne requiert, dans notre modèle, que deux paramètres climatiques : les précipitations et l'humidité des sols. Ces paramètres influencent directement le comportement mécanique du sol et donc, par extension, la variable de résistance à la pénétration au cône. Nous avons ainsi analysé les variables de précipitations contenues dans les archives afin de contrôler les estimations du modèle d'assimilation GLDAS. Depuis 1995, les stations météorologiques au sol ne sont plus suivies et les précipitations ne sont plus estimées qu'à partir de capteurs satellitaires et de modèles météorologiques (Olivry *et al.*, 1996 ; Massuel, 2001). Leurs corrélations sur la période 1980 – 1995 nécessitent certains ajustements.

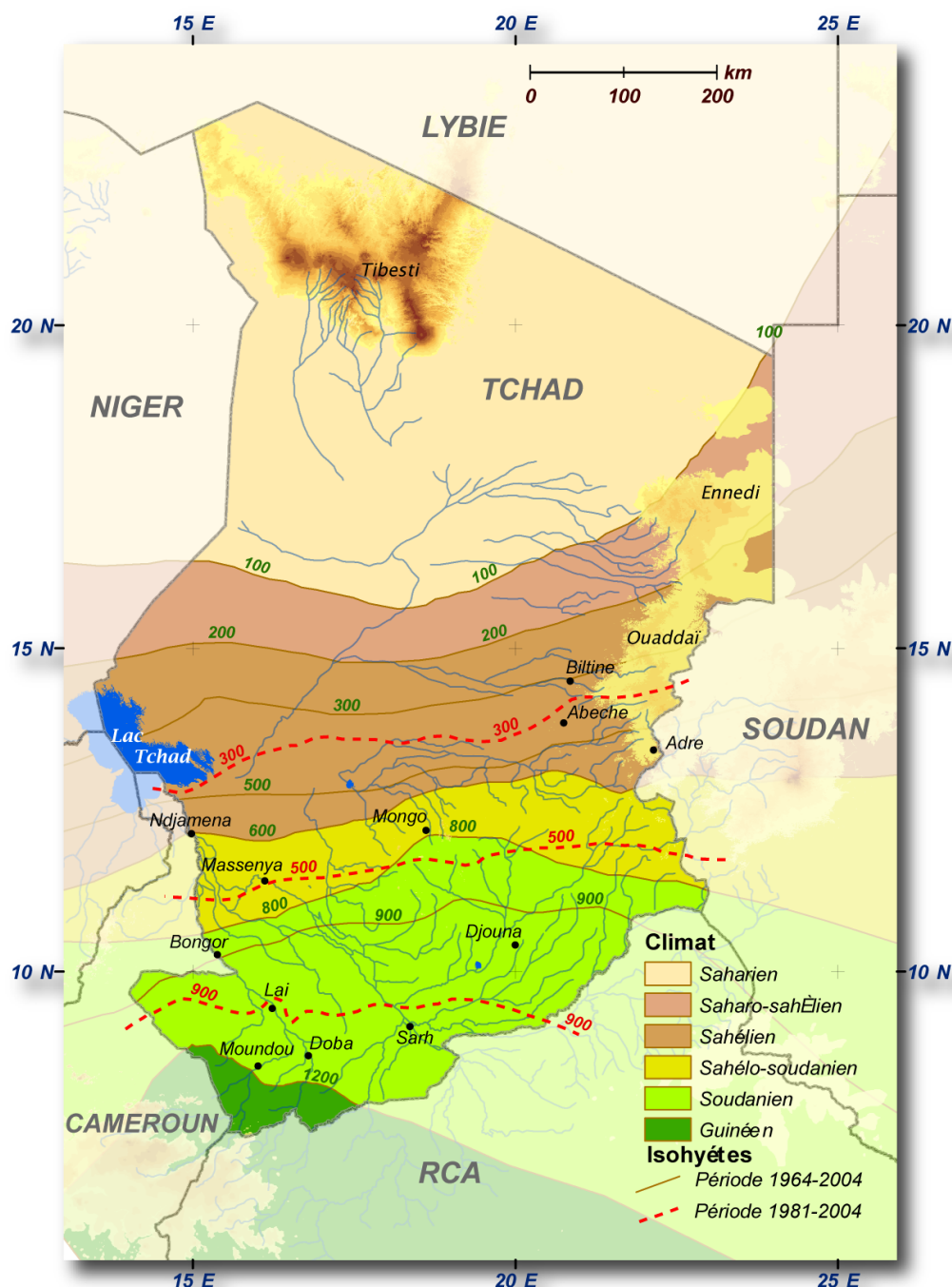


Figure 26 : Répartition des zones climatiques du Tchad et évolution des isohyètes de précipitations

La durée de la saison humide décroît à mesure que l'on progresse vers le nord. Ceci est dû à la perte d'énergie des vents, en provenance de l'équateur, déplaçant le front de mousson. Cette progression n'est pas constante en termes de durée, de rythmicité (décalage du début de la saison des pluies) ou de distance maximale à l'équateur. Depuis la sécheresse des années 1970-1980, le renforcement de l'anticyclone saharien a consigné le flux de mousson au sud du 14° parallèle, sauf durant les années exceptionnelles de 1992 et de 1994 (Olivry *et al.*, 1996). Une des conséquences les plus visibles en est la décroissance de la surface du lac Tchad (Mohler *et al.*, 1989 ; Wald, 1990). Les conséquences de cette aridité croissante sur l'hydrodynamisme du complexe fluvio-lacustre Chari – lac Tchad sont importantes (Massuel, 2001) : ralentissement du rythme de renouvellement annuel de la végétation et accélération de l'érosion des sols (Brunet-Moret, 1967). Dans les régions du Salamat et de l'Ouaddaï, les oueds pratiquement asséchés n'irriguent plus que des surfaces restreintes.

3.3.1. La migration de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT), indicateur de la saison des pluies ?

La migration de la trace au sol de la ZCIT au-dessus de la cuvette tchadienne est générée par l'extension et la régression des masses d'air polaire, qui déplacent les cellules atmosphériques et les centres de pression thermique.

3.3.1.1. Profil troposphérique du front de mousson et zone d'influence au sol

La zone d'influence au sol du front de mousson forme une bande longitudinale de 5 000 à 8 000 km, divisée en quatre secteurs caractéristiques (Figure 27). Son observation satellitaire par imagerie basse résolution MODIS (Figure 28), permet de suivre quotidiennement sa progression et de prévoir l'arrivée prochaine des précipitations sur une région particulière. Du sud vers le nord, se distinguent (Figure 27) :

- **une zone D**, correspondant à une extension de l'anticyclone subtropical austral qui s'étend au-delà de l'équateur. Le fractionnement des stratocumulus en couches multiples en cours d'après-midi donne de courtes averses ;
- **une zone C**, large de 1 200 à 1 500 km, caractérisée par un front de précipitation orienté est-ouest se déplaçant vers le nord avec des orages parfois violents et de fortes averses. Les nuages denses convectifs atteignent 10 à 15 km d'épaisseur. La vitesse du vent en surface atteint souvent 60 nœuds au passage de la ligne de grains ;
- **une zone B**, transitoire entre le front de mousson au sud et un ciel dégagé, est large de 200 à 500 km. Le ciel y est peu nuageux avec des cumulus dont la base se situe vers 1000 m d'altitude et peu développés verticalement (1500m). Seules quelques faibles averses sur les reliefs et de rares vents de sable se produisent. C'est dans cette bande que se développent les lignes de grain ;
- **une zone A**, située au nord du front. Le ciel y est généralement serein avec des formations cirriformes. Les rares perturbations sont formées sur le front des alizés et donnent un ciel couvert et des grains. La visibilité est généralement bonne, sauf dans les vents de sable, dont la fréquence est maximum sur le sud du Sahara.

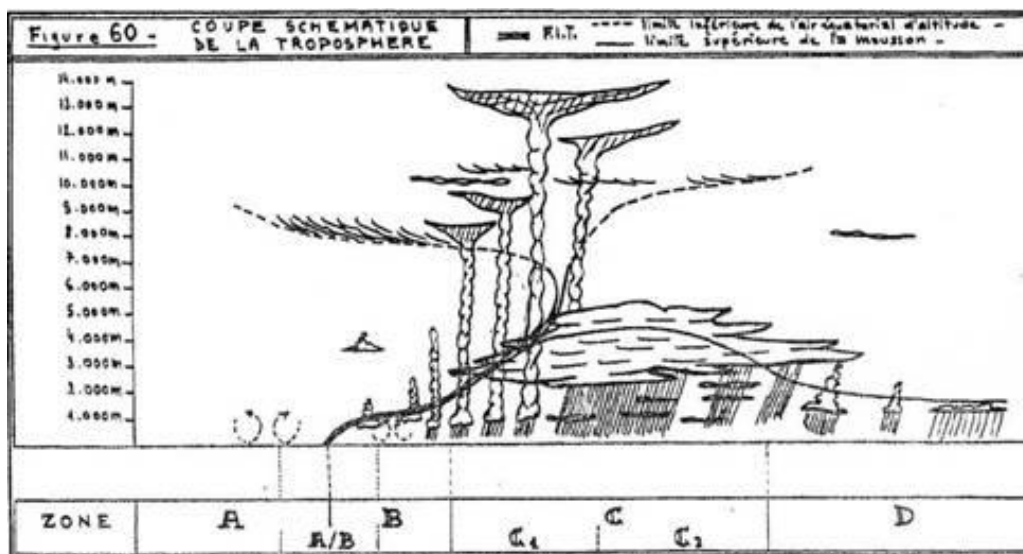


Figure 27 : Coupe transversale schématique en août de la troposphère au-dessus de l'Afrique vers le méridien origine, (Flohn, 1965)

Les précipitations peuvent se produire dans les zones B et C, mais c'est bien le passage du front qui refroidit le sol et diminue l'évaporation. Les pluies de mousson de la zone C durent de plusieurs heures à plusieurs journées alors que les grains de la zone B sont généralement de courte durée, inférieure à 5 heures (Mahé et L'Hôte, 1994).

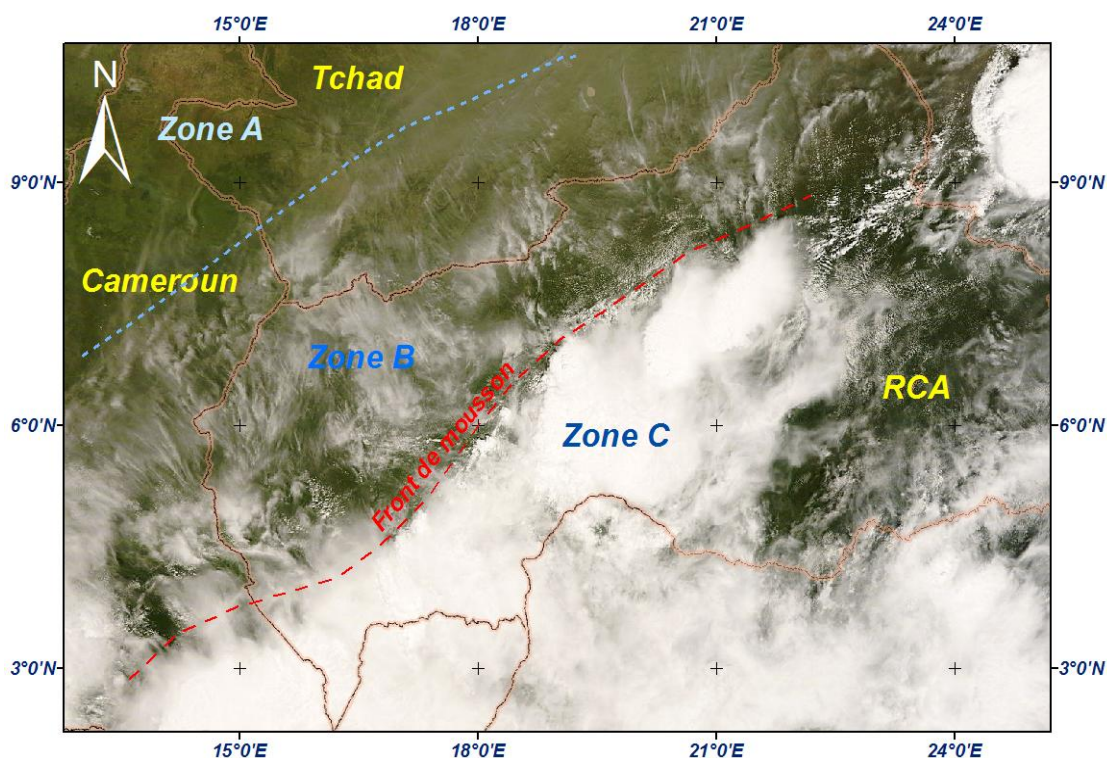


Figure 28 : Observation de la ZCIT par imagerie MODIS, au 12 octobre 2008

Sur une composition colorée du spectre visible de l'image MODIS, la densité des nuages de mousson apparaît en blanc. Les cirrus de la zone B, à plus haute altitude, forment un voile laiteux caractéristique.

3.3.1.2. Critère de délimitation temporel de la saison des pluies

L'observation satellitaire du passage du front de mousson (zone C, Figure 28) annonce de fortes précipitations. Néanmoins, il est indispensable de définir un critère quantitatif de reconnaissance du début et de la fin de la saison des pluies adapté aux mesures satellitaires.

En Afrique occidentale, les critères de Suchel (1988) sont les plus fréquemment utilisés. Basés sur la mesure du degré d'hygrométrie, ils sont calculés exclusivement à partir des stations météorologiques (L'Hôte, 1998) et ne peuvent donc pas être appliqués à notre problématique. Sivakumar *et al.* (1984) et Tchadieu *et al.* (1999) s'accordent pour considérer le début de la saison des pluies en zone sahélienne et soudanaise à partir d'une hauteur de pluies de 20mm cumulée sur 2 jours (pluies « utiles » ou « significatives »). Cette hauteur de précipitation est reconnue suffisante pour faire démarrer une végétation herbacée en zone pastorale (Lahuec, 1991). Le critère de fin de saison des pluies retenu par Stern *et al.* (1981) et Tchadieu *et al.* (1999), soit une séquence de 20 jours secs consécutifs, présente l'avantage de ne pas tenir compte des faibles pluies tardives. La définition du jour sec est donnée par $P < 2T$ (avec P =précipitations et T =températures moyennes mensuelles ; critères de Birot (1973) et de Gaussen (1952). Ces critères de début et fin de saison des pluies sont retenus pour l'élaboration des diagnostics de traficabilité au Tchad méridional.

La hauteur de 20 mm de pluies utiles se corrèle avec le changement de teinte observée sur imagerie MODIS, traduisant le début du développement de la végétation. Nous retiendrons ce marqueur pour encadrer la durée de la saison des pluies. Les dates de début et de fin de saison des pluies sont extraites des données de précipitations et de températures dérivées du capteur satellitaire TRMM.

3.3.1.3. Variabilité spatiale et temporelle de la saison des pluies

Sur la base des critères définis précédemment, nous avons constaté que ces dates étaient plus fluctuantes en climat sahélien, au nord du 11° parallèle, qu'au sud (Figure 29 et Figure 30). Réalisées à partir des données de précipitations et de température du satellite TRMM disponibles sur la période 1998 – 2008, ces analyses confirment les observations similaires de Tchadieu *et al.*, (1999) sur la province de l'Extrême Nord Cameroun (P.E.N.). Par ailleurs, la lecture des données de précipitations, 5 jours avant et 5 jours après la date de début de saison des pluies, montre un brusque démarrage de l'activité pluvieuse, passant de moins de 8 mm à plus de 50 mm. Le passage du front de mousson, que nous avons suivi quotidiennement par imagerie MODIS pour la période 2004-2008, a toujours lieu pendant cette période. La date de fin de saison des pluies varie sur un intervalle de temps inférieur pour les régions les plus septentrionales, de début septembre pour Abéché à mi-octobre pour Doba (Figure 30).

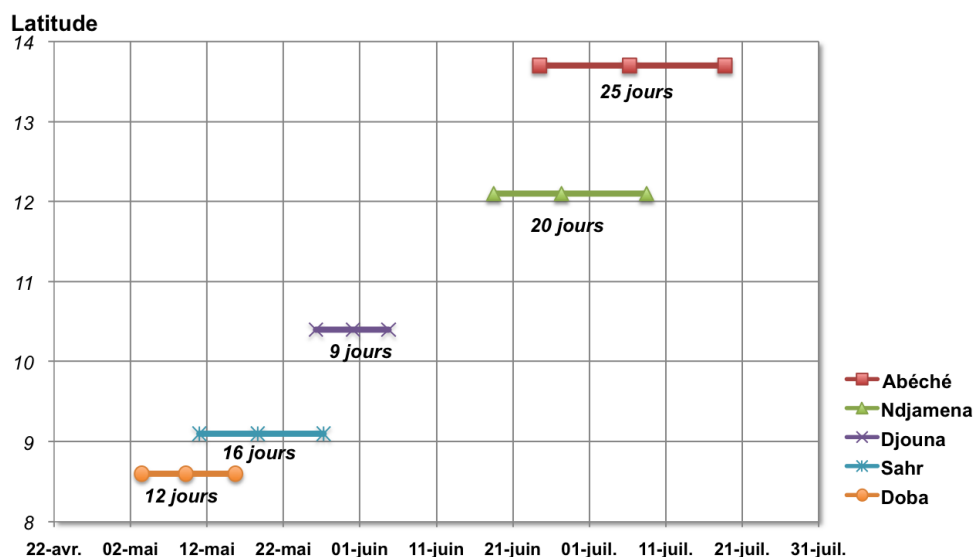


Figure 29 : Etendue de la variabilité des dates de début de saison des pluies de 1998 à 2008, pour 5 localités du Tchad méridional, réparties selon leur latitude

Chaque groupe représente une période pendant laquelle débute la saison des pluies. On remarque que cette période est sensiblement plus longue pour les localités les plus septentrionales, Abéché et Ndjaména. Elle souligne l'irrégularité de la saison des pluies dans ces régions.

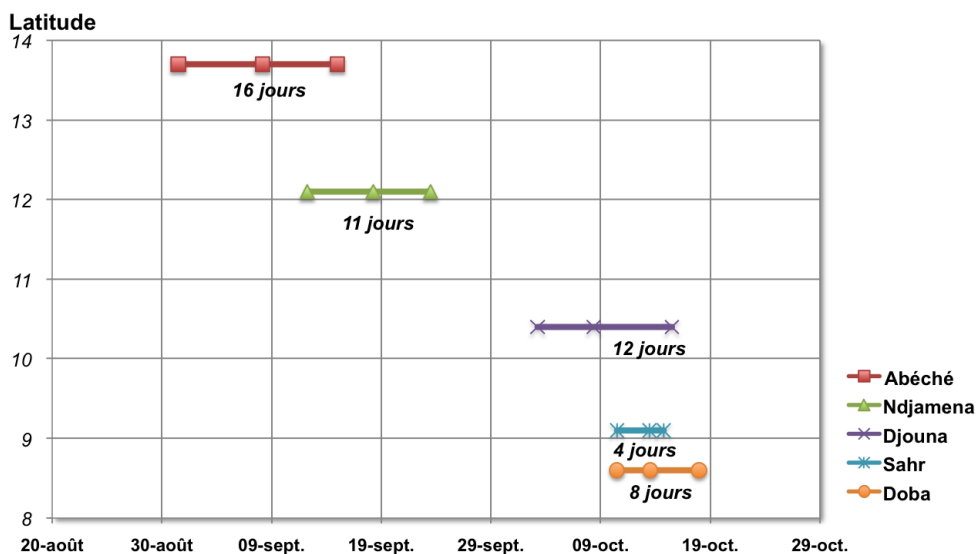


Figure 30 : Etendue de la variabilité des dates de fin de saison des pluies de 1998 à 2008, pour 5 localités du Tchad méridional, réparties selon leur latitude

Sur la période 1998-2008, la durée de la saison des pluies est très variable (6 à 11 décades). Les limites se corrélaient toujours bien avec la migration de la ZCIT (Figure 31). Etablie pour les localités de N'Djaména, Sarh, Djouna et Abéché, la corrélation entre la date de démarrage du début des pluies et sa durée montre qu'un démarrage précoce de la saison des pluies promet une longue durée de celle-ci (Figure 31, Figure 32). En revanche, à Doba, la plus méridionale des localités considérées, l'année est découpée en deux saisons d'égale durée (de 140 à 170 jours de pluies) et l'arrivée du front de mousson n'a pas d'incidence notable sur le comportement global de la saison. Ces conclusions rejoignent les observations de Tchadiou *et al.* (1999), menées pour huit villes du Cameroun.

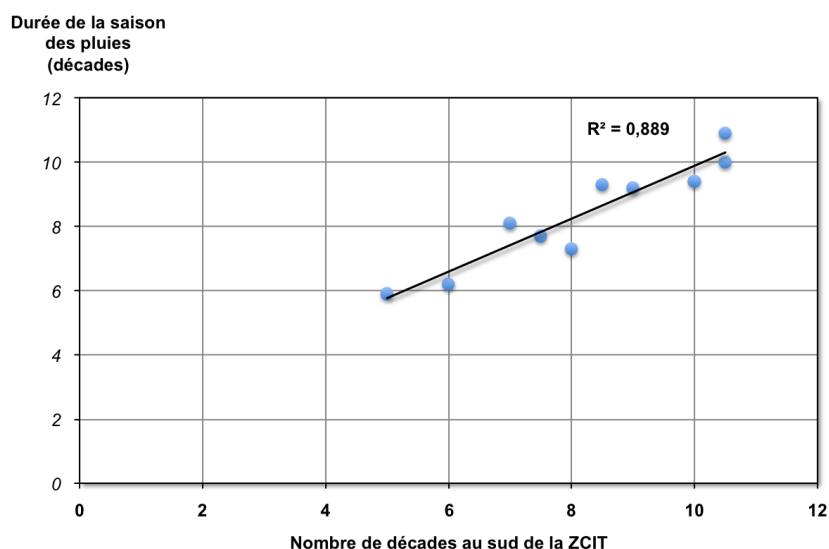


Figure 31 : Corrélation entre la durée de la saison des pluies et la durée de la présence du front de mousson au nord de N'Djamena.

Les données de précipitations sont issues du satellite TRMM pour l'intervalle 1998-2007, la position de la ZCIT à N'Djamena a été suivie sur les images MODIS de 2004 à 2007, relevées quotidiennement.

Cette première analyse du comportement de la saison des pluies se synthétise en trois points :

- la saison des pluies est de plus en plus courte et de plus en plus tardive au fur et à mesure que l'on remonte vers le nord. Au nord du 12° parallèle, le démarrage de la saison est plus difficile à placer car sa variabilité augmente ;
- le front de mousson observé par imagerie MODIS est un bon indicateur qualitatif du démarrage de la saison des pluies. Son suivi situe ainsi très précisément le démarrage de la saison des pluies ;
- la durée de la saison et le démarrage de la saison sont corrélés par une relation linéaire, excepté sous climat soudanien. Cet indicateur situe avec une précision de l'ordre d'une dizaine de jours la fin de la période de pluie.

Ces critères qualitatifs sont à corréler avec les estimations quantitatives de précipitations.

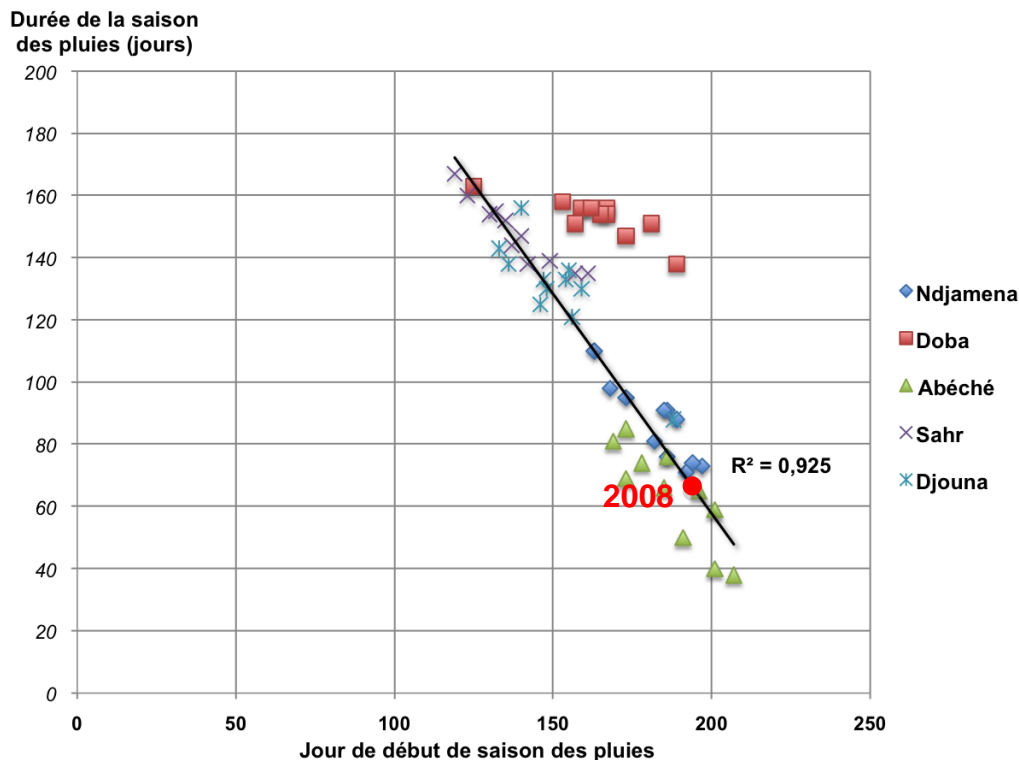


Figure 32 : Corrélation entre la date de démarrage du début des pluies et sa durée, de 1997 à 2008, pour 5 localités du Tchad méridional

Quatre localités situées sous climat sahélien et soudanien s'alignent selon une droite. La durée de la saison des pluies est inversement proportionnelle à son démarrage et celui-ci est d'autant plus tardif que la localité est éloignée de l'équateur. Les paramètres climatiques de la ville de Doba ne sont pas pris en compte dans la régression car l'indépendance de la date de début de saison de pluies vis à vis de sa durée la situerait sous un climat franchement soudanien voire guinéen. Les quatre autres localités passeraient alors sous un climat soudano-sahélien, en accord avec l'évolution climatique de cette zone tropicale observée depuis 50 ans.

3.3.2. Analyse des précipitations

Les études menées sur la variabilité de la répartition spatiale des précipitations a mis en évidence la dégradation des apports pluviométriques depuis 1968 et un recul des isohyètes de 300 km en moyenne vers le sud (Toupet, 1992 ; Olivry *et al.*, 1996 ; Baohoutou, 1997), y compris dans la région du Logone (Massuel, 2001). S'il est encore considéré dans la littérature que le Tchad méridional est sous un climat tropical sahélien au niveau de la capitale, soudanien dans sa partie centrale et guinéen au sud, les mesures et observations climatologiques de ces dernières années auraient tendance à décaler ces tranches climatiques largement vers le sud. Afin d'éviter ce biais, les variables climatiques sont considérées dans leur ensemble, sans distinction d'attribution climatique.

Les climats de l'Afrique occidentale et centrale sont essentiellement caractérisés par leurs régimes des précipitations (Brunet-Moret, 1966 ; Brunet-Moret, 1967 ; Suchel J. , 1988 ; Mahé et L'Hôte, 1994; Olivry *et al.*, 1996). L'analyse des précipitations est réalisée à partir des pluies annuelles, mensuelles et journalières, mesurées aux stations régionales jusqu'en 1995, puis estimées ensuite à partir des satellites météorologiques.

3.3.2.1. Précipitations annuelles

Les mesures des précipitations ont été corrélées avec les estimations satellitaires pour la période 1979-1995 (Figure 33). Parmi les projets opérationnels d'estimation surfacique des précipitations, le Global Precipitation Climatology Project (GPCP) combine les données en temps réel et les archives des mesures de précipitations des satellites météorologiques GOES, Météosat, GRS, TRMM et la série des NOAA. Ces mesures d'archives sont des moyennes mensuelles, estimées à une maille de deux degrés carrés. La bonne corrélation de ces valeurs valide les mesures de précipitation satellitaires surfaciques (Figure 33).

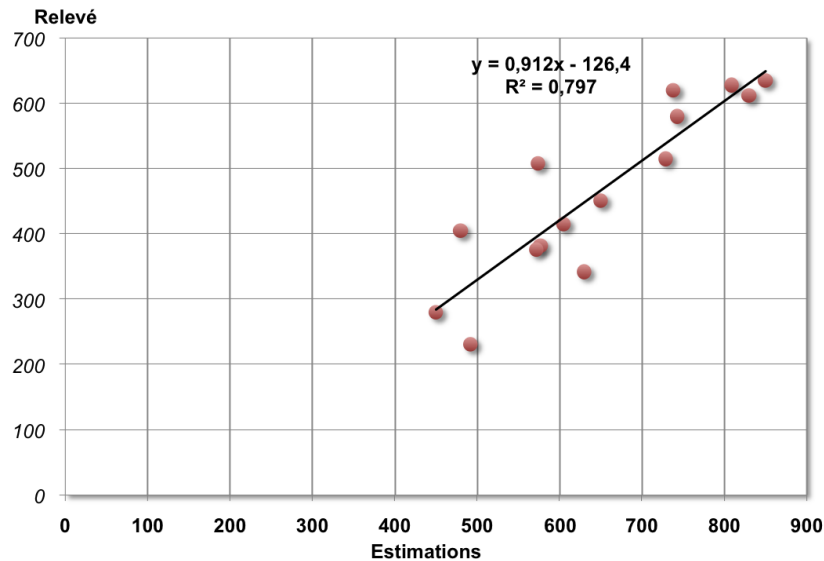


Figure 33 : Corrélation entre les relevés de précipitations d'Olivry et al. (1996) et les estimations surfacique de précipitations des données du projet GPCP (en mm cumulé).

Nous avons appliqué un coefficient de régression aux relevés de précipitations annuelles sur N'Djamena (Figure 34), à partir de 1995. Les précipitations sont très inégales en intensité d'une année à l'autre, mais elles ont tendance à diminuer fortement depuis 1960. Ainsi, les estimations de l'intervalle 1994-2007 (490 mm) rejoignent les valeurs de la sécheresse de 1968-1988 (470 mm).

La moyenne des relevés de précipitations annuelles aux stations de Doba et de Sahr varie entre 900 et 1200 mm. La tendance déficitaire depuis 1968 est constatée sur ces relevés, mais reste cependant moins prononcée qu'à la station de N'Djamena.

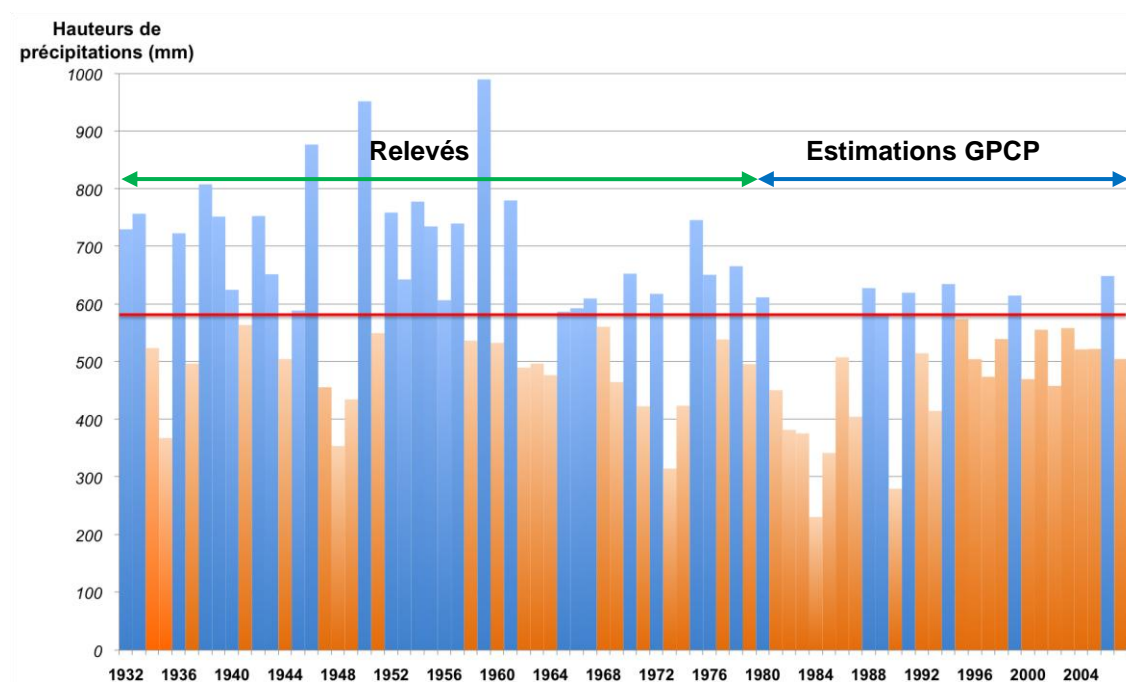


Figure 34 : Diagramme des précipitations annuelles sur N'Djamena de 1932 à 2007, à partir des relevés de Mahé (1993), Olivry *et al.* (1996) et des estimations satellitaires (les années déficitaires apparaissent en orange)

Les valeurs enregistrées pendant la période 1932-1994 sont de 990 mm pour la plus élevée (1959) et de 231 mm pour la plus faible (1984), pour une moyenne de 577 mm. Elles se répartissent entre 29 et 65 jours de pluies (Mahé, 1993; Mahé et L'Hôte, 1994). Sur les 15 dernières années, les années 1999 et 2006 ont été marquées par une saison des pluies plus étendue et plus intense aux mois d'août, par rapport à la normale.

3.3.2.2. Précipitations mensuelles

La distribution saisonnière des précipitations suit une fonction unimodale stable (Figure 35). Nulles pendant les mois d'hiver, elles augmentent progressivement jusqu'à atteindre un pic au mois d'août, quelle que soit la région du Tchad méridional considérée. Elles décroissent ensuite brusquement sur septembre–octobre avec le retrait du front de mousson. Les régions situées au sud du 10° parallèle reçoivent les premières précipitations en moyenne deux mois avant les villes du nord, N'Djamena et Abéché, respectivement situées à 12° et 13,7° de latitude nord. Juillet, août et septembre voient tomber 76% des précipitations annuelles à N'Djamena, 85% à Abéché, et seulement 63 % à Doba, Sahr et Djouna. A mesure que s'affirme la tendance sahélienne du climat vers le nord, les précipitations diminuent et se produisent sur une période plus courte. Ces résultats, que nous avons obtenus à partir des estimations du satellite TRMM sur la période 1998-2008, sont en accord avec les mesures relevées par Olivry *et al.* (1996), Mahé et L'Hôte (1994), et Baohoutou (1996).

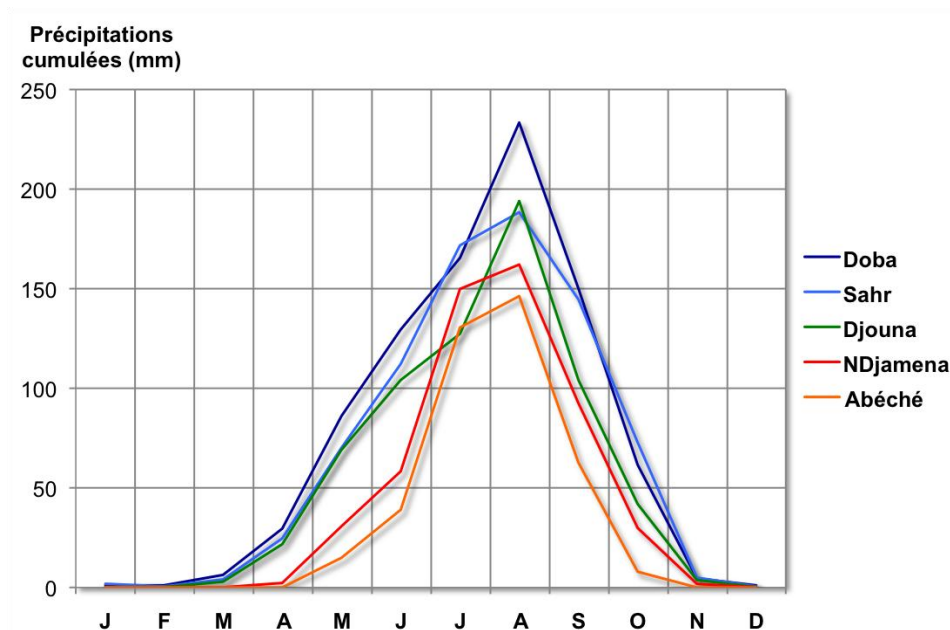


Figure 35 : Distribution des précipitations mensuelles moyennes, pour 5 localités du Tchad méridional, à partir des données du satellite TRMM, pour la période 1998-2008.

3.3.2.3. Précipitations journalières

La mousson africaine produit des orages : des précipitations très intenses qui peuvent déverser plus d'un mètre de pluie en quelques heures. Les conséquences sur la dégradation mécanique des sols et les conditions de traficabilité sont immédiates.

A partir des estimations du capteur TRMM, nous avons observé que la fréquence des plus fortes précipitations journalières, ainsi que leur intensité augmentent au fur et à mesure que l'on progresse vers l'équateur. La fréquence de ces averses croît d'une à deux par an à N'Djaména à 3 à 5 par an à Doba. Leurs intensités sont comprises entre 35 et 50 mm à N'Djaména, 55 à 70 mm à Bongor et 85 à 105 mm à Doba.

Par ailleurs, nous avons voulu vérifier si l'intensité et la date des précipitations issues des averses précoces suivaient la logique de répartition spatiale des pluies de mousson et ainsi fournir un indice sur l'intensité des précipitations de la saison humide. Les intensités les plus fortes, autour de 45 mm (Figure 36), ont été enregistrées à N'Djaména, Sahr et Abéché, contre un maximum de 40 mm à Djouna et 35 mm à Doba. Cependant, elles ne correspondent pas aux années les plus pluvieuses. La fréquence de ces pluies est irrégulière d'une année sur l'autre et de distribution hétérogène dans l'espace tchadien méridional. En revanche, ces averses se déclenchent en moyenne de trois à quatre décades plus tôt à N'Djaména et Abéché qu'au sud du 10^e parallèle (Figure 37). Progressant en avant du flux, le gain en puissance et en vitesse de l'onde de grains déclenche des orages plus violents. Ces manifestations locales ne sont pas indicatives du comportement de la saison humide, mais sont cependant suffisantes pour dégrader la praticabilité des pistes et des routes de sols nus. Les grains tardifs sont rares et de faible intensité.

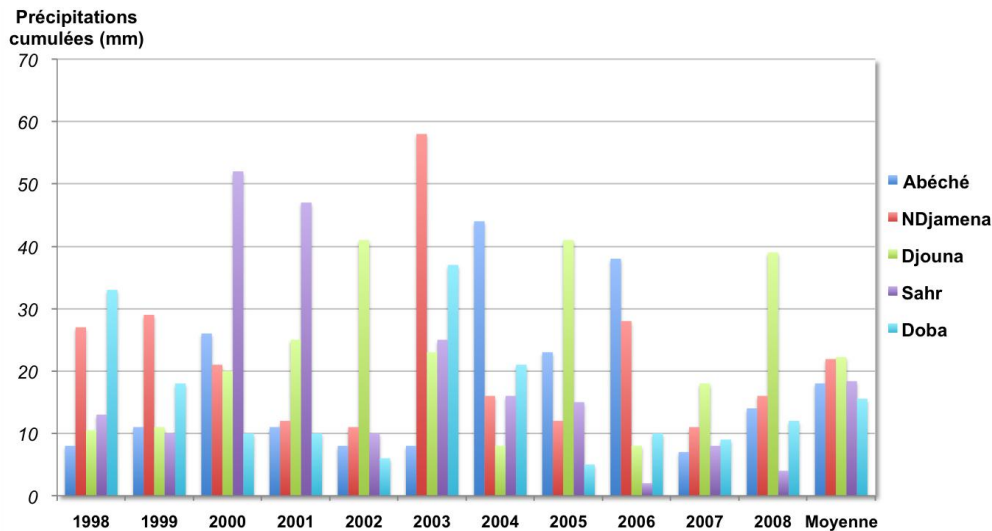


Figure 36 : Précipitations journalières des averses précoces pour cinq localités du Tchad méridional, de 1998 à 2008 (Données du satellite TRMM)

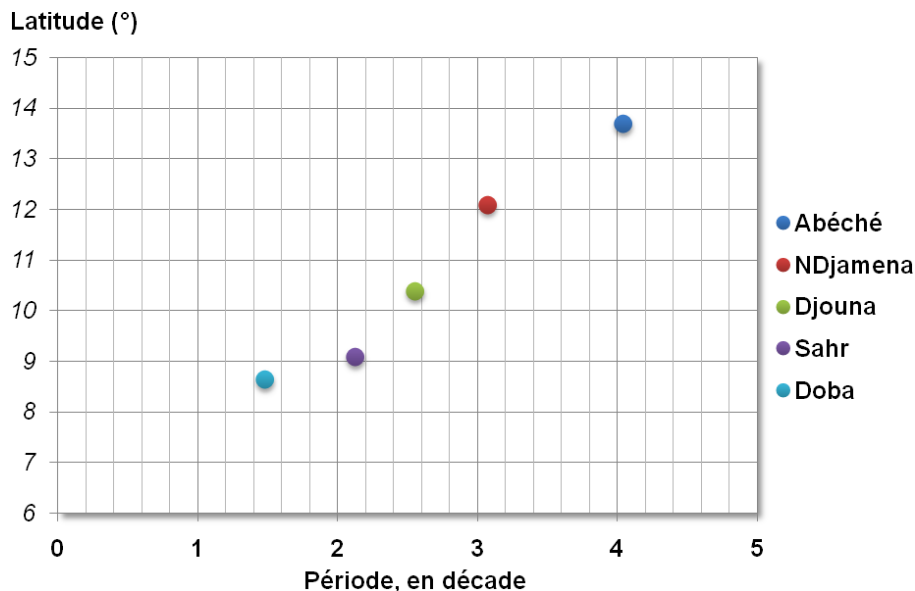


Figure 37 : Corrélation entre la latitude du lieu des averses précoces et la période temps le séparant de l'arrivée du flux de mousson, pour cinq localités du Tchad méridional (Données du satellite TRMM)

L'analyse des valeurs de précipitations journalières, mensuelles et annuelles n'apporte pas d'indications complémentaires sur la prévision du comportement de la saison humide. L'intensité des pluies est très variable au sein d'une même saison et la quantité d'eau météorique cumulée est logiquement corrélée à la durée de la saison des pluies (Figure 35). Le comportement des averses précoces ne semble pas être lié à la progression du flux de mousson.

3.3.3. 2008, une année climatique normale ?

L'analyse statistique des variables climatiques du Tchad méridional sur les dernières décennies tend à indiquer une nette diminution des précipitations. Elles se stabiliseraient à un niveau sensiblement équivalent à la sécheresse des années 70-80 malgré une forte variabilité annuelle et des années considérées comme pluvieuses.

La baisse des précipitations entraîne une baisse du niveau des rivières, elle-même amplifiée par des phénomènes anthropiques (création de retenues et barrages ; irrigation en amont,...). Cette tendance est confirmée par de nombreuses observations géographiques : recul important des rives du lac Tchad, baisse du niveau des rivières et du fleuve Chari, avancée des dunes vers le sud.

La méthode que nous avons mise en place est appliquée sur l'année 2008 (mesures d'humidité, de précipitations et acquisitions radar). Cette année est représentative du contexte climatique de la dernière décennie que nous avons évalué à partir de deux séries d'observations :

- la saison des pluies a débuté à N'Djamena le 174^e jour et a duré 93 jours. Elle se situe ainsi sur la droite de corrélation (Figure 32). La ZCIT a en effet franchi le 12^e parallèle le 25 juin et a atteint le tropique du Cancer, le 25 août. Elle s'est retirée au sud du 12^e parallèle, le 24 septembre. Ces dates sont dans les moyennes décennales (Figure 29 et Figure 30) ;
- les précipitations cumulées durant la saison des pluies (hors grains) sont légèrement inférieures à la moyenne décennale pour les régions situées au nord du 10^e parallèle (430 mm à Ndjaména, 520 mm à Abéché) à l'exception du massif du Guéra (Figure 38). A l'inverse, les régions du sud ont été plus arrosées que la moyenne décennale, en restant au-dessus de 900 mm de pluies. La saison des pluies a également duré plus longtemps avec un mois d'août très pluvieux.

Le flux de mousson est remonté en arc sur le massif du Guéra, en se déportant légèrement vers l'est. Les pluies ont été moins soutenues que d'habitude sur l'ouest du Tchad méridional, mais plus importantes dans la région de l'Ouaddaï (environ 150 mm).

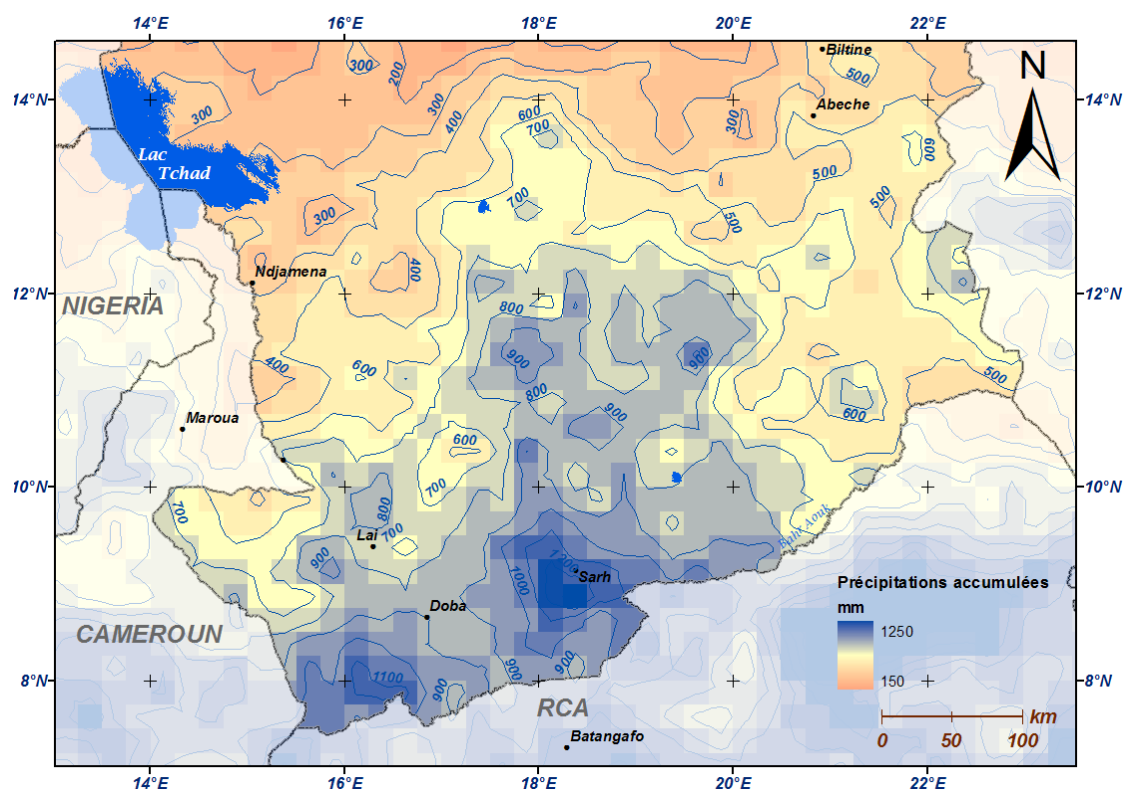


Figure 38 : Carte de répartition des précipitations cumulées pour l'année 2008, estimées par le capteur satellitaire TRMM.

3.4. Caractéristiques pédologiques des sols du Tchad méridional

Le travail que nous avons effectué sur les données pédologiques se décompose en deux points :

- **l'homogénéisation** des 45 classes de sol du Tchad méridional, à partir de leurs propriétés physico-chimiques des sols et de la morphologie pédogénétique de 250 profils issus des cartes pédologiques régionales. Nous avons ensuite harmonisé et synthétisé ces classes conformément à la taxonomie morphogénétique mondiale (FAO, 2006) ;
- la **description** des caractéristiques géomorphologiques, de la couleur apparente par imagerie optique et du type de végétation associé à ces classes pédologiques. Ces caractéristiques ont été collectées pour chacune d'entre elles. Elles fournissent ainsi des éléments d'interprétation pour l'extraction de l'occupation du sol par imagerie THR Quickbird (cf. ch.4) ;

La cartographie pédologique de la FAO (FAO, 1971-1981; FAO, 2006) constitue le support de la carte de traficabilité globale. A cette échelle, nous parlons de risque de traficabilité, car ce résultat ne prend pas en compte tous les paramètres inclus dans notre méthodologie (relief, végétation, obstacles...). L'estimation du risque de traficabilité est dérivée des propriétés géotechniques des quarante premiers centimètres (couche critique ou *critical layer*). Cette strate correspond à un ou plusieurs horizons pédogénétiques de nature différentes, identifiés dans les bases de données pédologiques en tant que « topsoil ».

La cartographie pédologique régionale harmonisée, ainsi que les profils pédologiques servent de base d'échantillonnage pour la calibration et la validation des classifications multispectrales (cf. ch 4).

Nous avons réalisé une homogénéisation des cartes pédologiques du Tchad sur la base des propriétés physico-chimiques de texture, teneur en matière organique, capacité d'échange cationique et structure génétique des profils. Le seuillage analytique de ces valeurs transpose environ 4% des profils, que l'on considère alors comme mal classé. Les valeurs moyennes de texture et de teneur en matières organiques pour chacune des classes analysées sont présentées dans le tableau suivant.

	Groupe	Texture (moy sur 40 cm)				Matière organique	Classe WRB (FAO, 2006)
		argile	silts	sable	graviers		
<i>Sols ferralitiques</i>	faiblement ferralitiques	0,193	0,175	0,631	0	0,01	<i>NITOSOLS</i>
	faiblement ferralitiques modaux	0,148	0,051	0,8	0	0,015	
	faiblement ferralitiques jeunes	0,044	0,06	0,88	0	0,011	
<i>Sols ferrugineux tropicaux</i>	non ou peu lessivés	0,093	0,042	0,864	0	0,004	<i>LIXISOLS FERRIQUES</i>
	non ou peu lessivés jeunes	0,192	0,094	0,713	0	0,027	
	non ou peu lessivés modaux	0,148	0,034	0,818	0,004	0,0132	
	non ou peu lessivés hydromorphes	0,1094	0,082	0,81	0	0,0115	<i>LIXISOLS GLEYIQUES</i>
	non ou peu lessivés évolués	0,0955	0,0489	0,855	0	0,007	
	lessivés sans concrétion	0,113	0,12	0,772	0,03	0,009	
	lessivés à tâche et concrétions	0,08	0,138	0,782	0,114	0,008	
	lessivés hydromorphes	0,137	0,1	0,763	0	0,0118	
	lessivés sur cuirasse (3 ss classes)	0,17	0,1	0,73	0,19	0	
<i>Sols bruns subarides</i>	bruns	0,067	0,049	0,884	0,0024	0,0051	<i>ARENOSOLS</i>
	brun rouge sur matériau sableux	0,055	0,02	0,92	0	0,013	
<i>Sols minéraux bruts</i>	d'apport fluviatile	0,219	0,274	0,508	0	0,0247	<i>FLUVISOLS</i>
<i>Sols halomorphes</i>	salins à alcalis (3 ss classes)	0,27	0,14	0,57	0,06	0,016	<i>SOLONETZ</i>
	à alcalis lessivés à action de nappe	0,2	0,06	0,74	0	0,009	<i>SOLONCHAKS</i>
	à argile dégradée	0,11	0,06	0,83	0	0,001	
	à argile dégradée à action de nappe	0,065	0,04	0,895	0	0,001	
<i>Sols hydromorphes</i>	à gley, à tâche et concrétion	0,269	0,153	0,578	0,001	0,009	<i>GLEYSOLS</i>
	à gley d'ensemble (4 ss classes)	0,33	0,17	0,497	0,003	0,009	
	à gley de profondeur	0,308	0,127	0,565	0	0,015	
	à gley salés	0,218	0,151	0,631	0	0,009	<i>PLANOSOLS</i>
	à pseudogley	0,317	0,205	0,478	0	0,018	
	à pseudogley, à tâche et concrétion	0,115	0,057	0,828	0,001	0,005	
	à pseudogley de profondeur	0,114	0,09	0,795	0	0,004	
	à pseudogley, sol gris à microbutte	0,08	0,09	0,83	0	0,012	
	à pseudogley, à nodules calcaires	0,327	0,092	0,58	0,02	0,013	
<i>Sols peu évolués</i>	d'érosion, lithosols	0,051	0,114	0,835	0,475	0,009	<i>LITHOSOLS</i>
	d'érosion, régosols	0,166	0,049	0,785	0,065	0,001	<i>REGOSOLS</i>
	d'apport	0,269	0,212	0,52	0	0,061	<i>FLUVISOLS</i>
	d'apport, hydromorphes	0,24	0,179	0,581	0,003	0,017	
	d'apport, de piedmont, sur matériau sableux	0,223	0,097	0,68		0,002	
<i>Vertisols</i>	hydromorphes temporaire d'ensemble	0,56	0,15	0,29	0	0,004	<i>VERTISOLS</i>
	hydromorphes à nodules calcaires	0,638	0,1	0,262	0	0,0525	
	hydromorphes argileux	0,432	0,165	0,403	0	0,005	
	hydromorphes structurés dès la surface	0,575	0,134	0,291	0	0,01	
	hydromorphes d'altération	0,405	0,065	0,53	0,165	0,04	

Tableau 2 : Correspondances entre les classifications Aubert (1965) et WRB (FAO, 1996) et propriétés texturales moyennes des sols du Tchad méridional

Les valeurs de texture et de teneur en matières organiques sont des moyennes pondérées des horizons pédologiques des échantillons décrits dans les notices des cartes pédologiques régionales. Ces valeurs sont représentatives de chaque classe car les écarts entre ces différents échantillons sont très faibles (<0,05).

3.4.2. Caractéristiques pédologiques des sols du Tchad méridional et profils types.

La pédogénèse actuelle, active depuis les dernières glaciations, a fait évoluer les altérites de l'Eocène et du Pléistocène en une cinquantaine de profils pédogénétiques types. Ils sont hérités de la diversification de leur nature lithologique, de la régression progressive du lac Tchad et de la morphologie en tôle ondulée du bassin où alternent les zones d'écoulement et de stagnation de l'eau météorique de surface.

Nous avons synthétisé les caractéristiques pédologiques de ces profils à partir des analyses et descriptions des échantillons de terrain des cartes pédologiques régionales (Figure 40 ; Barbeau, 1956 ; Abadie *et al.*, 1957 ; Pias, 1960 et 1970). Puis nous avons appris à reconnaître chacun de ces sols types à partir d'imagerie optique.

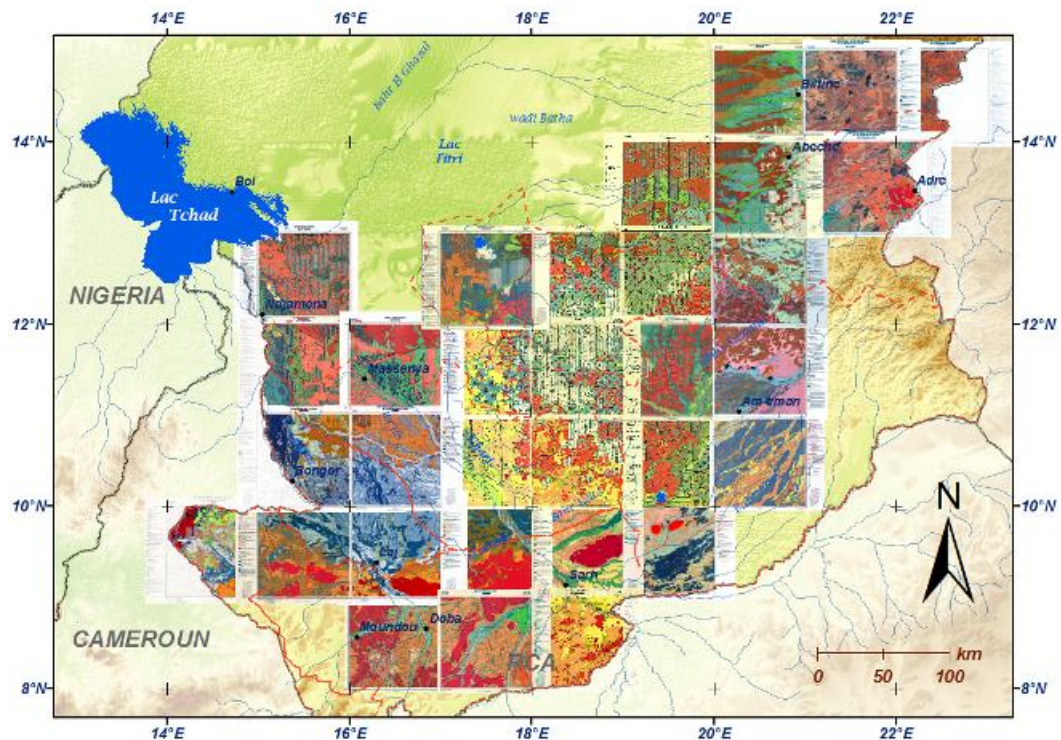


Figure 40 : Répartition des cartes pédologiques du Tchad méridional

Les écarts de couleurs entre les cartes traduisent la difficulté des auteurs à utiliser une nomenclature commune. Une même sous-classe n'est souvent pas représentée par une même couleur, à laquelle est souvent ajoutée une particularité locale. Ces cartes sont issues des missions de cartographies lancées par l'ORSTOM, entre 1954 et 1960. Les campagnes régionales de reconnaissances continueront jusqu'en 1979, année de la fermeture du centre régional de l'ORSTOM, et auront donné lieu à la publication de 34 cartes au 1/200 000. Elles couvrent toute la partie sud du Tchad, à partir du 14^e parallèle. Le découpage des unités pédologiques s'effectue selon la classification géomorphologique et physico-chimique établie par Aubert (1965).

La partie suivante détaille les propriétés d'identification caractéristiques de chacun des types de sols et accessibles par une observation spatiale. Elles concernent les caractéristiques géomorphologiques, la couleur vraie dans le spectre du visible sur les images optiques THR, la texture ainsi que le type de couverture végétale. Les propriétés pédologiques des sols ainsi que leurs profils types sont présentées en annexe 1.

Les **Lithosols** (FAO, 2006) sont des sols sableux grossiers à graveleux. Ils se développent dans les piedmonts de reliefs accidentés du socle plutonique de la bordure du bassin dans les régions de l'Ouaddaï et des cuirasses ferrugineuses du Haut Logone. Ils correspondent à des **sols d'érosion peu évolués** (Aubert, 1965). Ils marquent la transition entre les roches affleurant en haut du profil et les arènes profondes transportées par l'eau de pluie météorique, les eaux de ruissellement et les cours d'eau en contrebas. Ces sols perméables sont recouverts d'une végétation arbustive épineuse d'acacias, et d'herbacées groupées fréquemment avec des termitières, hautes de cinquante centimètres à un mètre. La composition de l'horizon supérieur leur confère une couleur ocre rouille à beige sur imagerie optique, en fonction de la proportion de quartz et d'oxyde ferreux. Les sols nus ne sont observables que de janvier à mars.

Les **Fluvisols** (FAO, 2006) sont des sols jeunes, sableux développés sur les sédiments alluvionnaires fluviaux des deux dernières évolutions du delta du Chari. Dans la plaine alluviale du Logone au niveau de Laï et de Bongor et dans les fonds de vallées des Koros, près de Doba, ces **sols peu évolués d'apport** (Aubert, 1965) sont concentrés sur les bourrelets de fleuves et sur les anciennes terrasses alluviales, le long des rives du Chari actuel. Ils évoluent vers des sols hydromorphes dans la plaine du Logone en s'éloignant des fleuves. La végétation qui recouvre les fluvisols des terrasses anciennes passe d'une savane à graminée dans la zone des Koros à une prairie marécageuse dans la plaine alluviale du Logone et du Chari. L'extension des bourrelets du Logone suit les cycles climatiques. En période de pluies, les crues les inondent presque entièrement, alors qu'une végétation herbacée se fixe sur les plus stables. En période sèche, les pistes les traversent transversalement, comme par exemple à Laï ou à Doba. Lorsqu'ils ne sont pas inondés, on reconnaît ces sols par leur teinte beiges (bourrelets) à ocre (terrasses) sur imagerie optique.

Les **Nitosols** (FAO, 2006) sont des sols rouges à brun-rouge tropicaux très épais (7-10m), rencontrés dans la partie amont des fleuves Logone et Chari. Ils constituent typiquement les sommets des Koros. Ce sont les **sols faiblement ferralitiques** décrits par Aubert (1965). Ces sols fertiles sont occupés par des cultures agricoles de sorgho, mil, coton, arachide et manioc, particulièrement dans le Logone occidental au sud et à l'ouest de Laï, ou recouvert d'une savane arborée haute et dense. Les parcelles de nitosols cultivés sont très nombreuses aux environs des grandes agglomérations du sud (Doba, Moundou...). Ils se distinguent alors des lxisols sur imagerie optique par une teinte ocre. Nus et non travaillés, ils prennent une couleur rouille.

Les **Gleysols** (FAO, 2006), ou **sols hydromorphes à Gley** (Aubert, 1965), sont saturés en eau suffisamment longtemps dans l'année pour former un horizon argileux à Gley, caractéristique des plaines alluviales. Ils reposent sur des alluvions quaternaires fluvio-lacustres argilo-sableuses à argileuses des plaines d'inondation au nord de Laï et de Bongor. Ils n'occupent que les surfaces restreintes de petites dépressions dans les plaines alluviales là où l'inondation est la plus longue. Au plus fort de leurs dessiccations, de janvier à mars, ils présentent des fentes de retrait peu profondes. Brulée en janvier-février, la végétation de prairie marécageuse à Andropogonées (annexe 1) repousse d'avril à décembre. Sur imagerie optique, ces sols apparaissent noirs à violacés. Associés avec les Planosols qui restent émergés, les gleysols sont progressivement recouverts par l'eau en période humide.

Les **Lixisols** (FAO, 2006) sont des sols évolués, enrichis en argile dans l'horizon de surface par migration. Caractéristiques des régions tropicales soudanaises, ils surmontent les anciennes cuirasses ferrallitiques dégradées du Continental Terminal et marquent la transition entre les reliefs des Koros et les sols vertiques des dépressions inondées du Logone, ainsi que le massif du Guéra et les plaines du Salamat. Ils correspondent aux **sols ferrugineux lessivés et peu lessivés** (Aubert, 1965). Très cultivés dans la région du Logone, ils sont recouverts d'une savane arborée soudanienne à arbustive à acacia et termitières au sud de l'Ouadaï et d'une savane herbacée dans la plaine du Chari et la zone des Koros. Sur imagerie optique, ils se différencient des nitosols auxquels ils sont associés par une teinte ocre plus claire en période sèche et plus foncée en période humide. Peu drainant, ils gardent donc l'eau plus longtemps et conservent cette teinte rouille après chaque pluie.

Les **Planosols** (FAO, 2006) sont des sols clairs à texture sableuse en surface progressant vers un horizon argileux à traces d'hydromorphie en profondeur. Ces sols ne représentent jamais de grandes surfaces. Au nord-est de N'Djamena et dans la région des Koros, ils occupent les points bas, oueds et oxbow lakes s'alignant entre les levées sableuses des deltas fossiles du Chari. Intergrade avec des sols halomorphes dans la plaine d'inondation du Logone entre Laï, Bongor et le Ba-Illi, ils forment des petites buttes exondées (dunes fossiles) au milieu de la prairie marécageuse recouverte par un mètre d'eau en période de pluie. Aubert (1965) classe ces sols en **sol hydromorphe à pseudogley**. Dans la plaine du Logone et près du lac Tchad, ils sont recouverts par une végétation herbacée marécageuse à Andropogonées. Le long du cours amont du Logone, la savane arborée clairsemée domine. Elle se raréfie au fur et à mesure de la progression de la saison sèche. Les sols sont largement utilisés pour la riziculture dans les régions du Logone-Chari. Ces sols sableux à hydromorphies se reconnaissent sur imagerie optique par des teintes grises plus ou moins claires. Dans la plaine du Logone, ils dessinent un réseau dendritique de bandes sableuses émergées de 200 à 500 m de large, héritées de la structure deltaïque du Chari.

Les **Vertisols** (Aubert, 1965; FAO, 2006) forment localement un microrelief de type « gilgai »⁽²⁾ et se répartissent dans la plaine de déversement du Logone, entre le Logone, le Ba Illi et le Chari, dans la haute plaine du Salamat et dans les bas-fonds des oueds du lac Fitri, au nord du Guéra. Utilisés périodiquement pour leur forte fertilité par des cultures tardives (sorgho et coton), les terrains les plus limoneux sont réservés à la riziculture. En dehors des zones agricoles, ils développent une végétation marécageuse à Andropogonées rarement arbustive. Les langues de terrain exondées sont incultes à cause d'une très forte salinité des sols. Ces sols très peu perméables sont inondés par la crue des fleuves en saison des pluies. De profondes fentes de dessiccation se forment en surface lorsque les sols s'assèchent. Le microrelief de type gilgai (annexe 1), se repère facilement sur imagerie optique THR par un fond noir pointé de tâches beiges. Les vertisols du Chari, aux environs de Massenya, forment une structure alvéolaire noirâtre.

Les **Régosols** (FAO, 2006) sont des sols très peu développés, typiques des **sols minéraux bruts d'érosion** (Aubert, 1965), généralement de moins 10 cm d'épaisseur. Ils

² Microrelief « gilgai » : surface irrégulière de petits monticules et dépressions, formés par les alternances de retrait-gonflement des argiles de l'horizon intermédiaire selon l'alternance de sécheresse et d'inondation

surmontent un socle rocheux magmatique altéré ou une cuirasse latéritique. Ces sols jeunes occupent les talwegs des massifs granitiques de l'Ouaddaï et du Guéra et de petites dépressions des plateaux de cuirasses ferrugineuses. Très drainants mais d'une faible capacité d'emménagement, ils ne sont saturés que lors des périodes de fortes averses. Ils ne sont recouverts que par de rares arbustes. Les surfaces qu'occupent les régosols sont généralement trop petites pour être reconnues par imagerie optique moyenne résolution de type Landsat 7 ETM+. Ils prennent une teinte beige sur imagerie optique THR,

Les **Arénosols** (FAO, 2006) sont des sols sableux quartziques. Rencontrés dans les zones plus arides du Tchad méridional, entre le lac Tchad et le lac Fitri. Ils remplissent les espaces interdunaires et se développent sur les sédiments sableux d'érosion éolienne. Cette classe de sol progresse vers le sud avec la désertification croissante, dont quelques bandes franchissent déjà les bras du bas Chari en occupant des espaces alluviaux. Ils correspondent aux **sols isohumiques bruns et brun-rouges subarides** (Aubert, 1965). Ils sont recouverts d'une végétation éparse de type steppe broussailleuse et herbacée à graminées. Sur imagerie optique THR, ces sols apparaissent ocres à brun et couvrent des surfaces homogènes planes, en association avec les planosols.

Les **Solonchaks** et les **Solonetz** sont des sols des zones arides (FAO, 2006). Les premiers sont des sols sablo-argileux non lessivés des régions à forte évaporation associés à une nappe phréatique proche de la surface. Ils sont classés dans **les sols halomorphes à alcalis lessivés et/ou argile dégradée** d'Aubert (1965). Les **solonetz** sont des sols denses, alcalins et fortement structurés, à horizon de surface argileux. Ils appartiennent aux **sols salins à alcalis**. Ces sols concentrent les éléments évaporitiques dans le fond et sur les bourrelets alluviaux des grands oueds du Salamat et des piedmonts de l'Ouaddaï où ils portent le nom de « naga » et de « hardé ». Ils aggravent la sécheresse des sols par réduction de la croissance végétale et diminution de la disponibilité de l'eau par stress osmotique. Une végétation halophytique clairsemée se développe sur ces sols en fin de saison des pluies. En période sèche, ces sols apparaissent blancs sur les images optiques THR, du fait de leur très forte réflectance. Ils se remarquent par une forme ovoïde allongée caractéristique.

3.5. Paramètres élémentaires et classification géotechnique des sols du Tchad méridional

La masse volumique, la teneur en eau, la nature et la composition minéralogique sont les paramètres fondamentaux qui influent sur le comportement mécanique des sols (Giroud *et al.*, 1972). La résistance à la pénétration au cône est alors estimée à partir de la spatialisation de ces variables et de l'état hydrique du sol à un instant donné.

La masse volumique et la teneur en eau sont des paramètres élémentaires du sol. La masse volumique est fonction de la constitution du squelette du sol. La teneur en eau évolue en fonction du volume relatif qu'elle occupe.

La nature et la composition minéralogique du sol sont déduites de sa classe géotechnique. Les classifications géotechniques des sols sont basées principalement sur les propriétés granulométriques, la teneur en matière organique et le degré de plasticité de la fraction argileuse. Chaque classe rassemble des sols présentant un comportement mécanique suffisamment similaire pour qu'il soit possible de leur appliquer les mêmes conditions d'utilisation en tant que couche de forme (LCPC-SETRA, 1992).

3.5.1. Paramètres élémentaires des sols du Tchad méridional

Le sol est un complexe dynamique triphasique, dont les phases constitutives, solides, liquides et gazeuses, sont respectivement représentées par des grains, de l'eau et de l'air (Musy *et al.*, 1991). Les paramètres élémentaires, sur lesquels repose la mécanique des sols, relèvent des relations de poids W et de volume V caractérisant la constitution du sol (Figure 41). Les indices s , w et a se réfèrent aux phases solides, liquide et gazeuse. La description des sols comporte des grandeurs représentatives, d'une part, des spécificités propres à chacune de ces trois phases, dites de nature, et, d'autre part, de leur volume relatif.

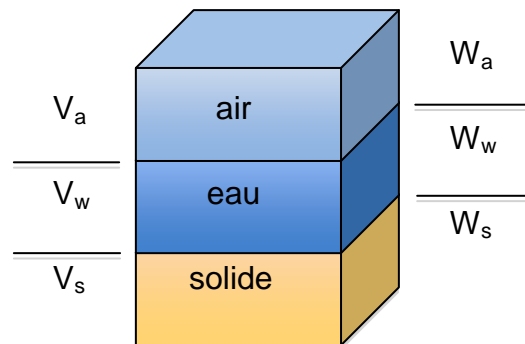


Figure 41 : Représentation schématique de la constitution d'un volume de sol

Les poids volumiques des grains solides γ_s , de l'eau γ_w et du sol humide γ , utilisés dans la classification géotechnique des sols, sont exprimés par les relations :

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad \gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \quad \gamma = \frac{W}{V} \quad [kN / m^3]$$

3.5.1.1. Paramètres de la phase solide

L'importance de la phase solide dans le sol est mesurée par le poids volumique du sol sec. Il est principalement fonction de la composition minéralogique et du degré de compaction du sol. Ce poids volumique varie de 10 kN/m³ pour un sol argileux à 17kN/m³ pour un sol sableux (Philipponnat *et al.*, 2000). Il est égal au rapport du poids du solide sur le volume total du sol sec. Le poids volumique d'un sol sec γ_d est ainsi inférieur au poids volumique des grains solides γ_s .

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \left[kN / m^3 \right]$$

Les travaux de Saxton *et al.* (1986) ont mis en évidence la relation entre la texture du sol (fractions argileuses, silteuses et sableuses) et la densité apparente du sol. Ils en ont déduit une équation simple, que nous avons appliquée à 244 échantillons de sol, synthétisés à partir des notices des cartes pédologiques, pour l'horizon superficiel. Nous avons alors converti le résultat en poids volumique apparent (Figure 42). La proportion des éléments grossiers n'est supérieure à 15% du volume de ces sols superficiels que 2 (soit 0,8%) des échantillons analysés (uniquement régosols et lithosols), et comprise entre 5 et 15% pour seulement 5 échantillons (soit 2%). Dans ces cas précis, le poids volumique est calculé sur le volume de la matrice résiduelle. La proportion d'éléments grossiers, considérée alors comme négligeable, est ignorée pour tous les autres échantillons.

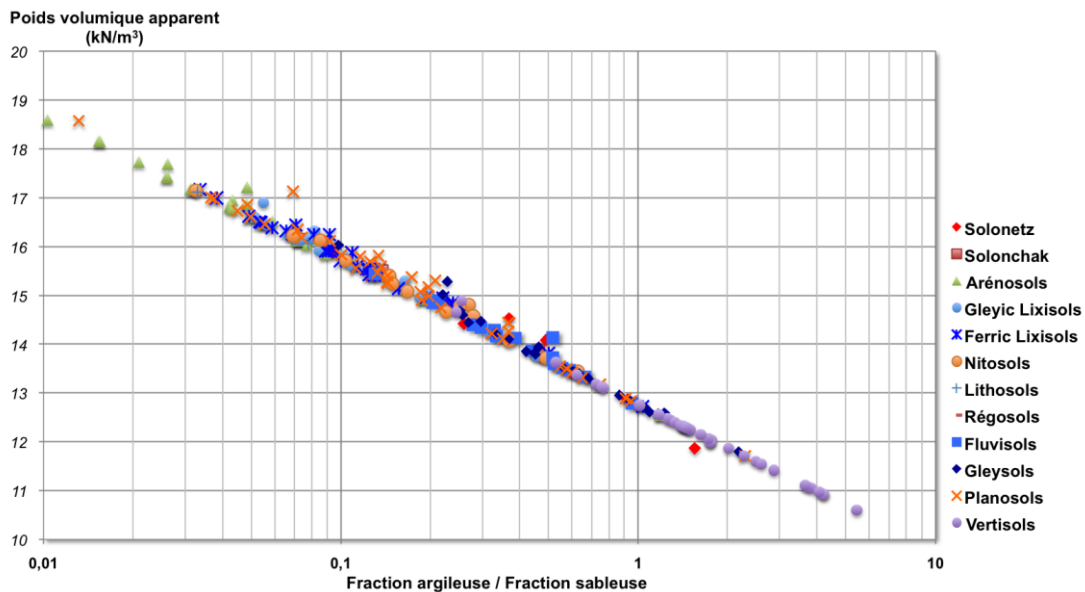


Figure 42 : Distribution du poids volumique apparent en fonction du rapport de la fraction argileuse sur la fraction sableuse, pour l'horizon superficiel des sols du Tchad méridional

Les sols du Tchad méridional sont des sols intermédiaires, composés d'un mélange de sable et d'argile en teneur variable. Au sein d'une même classe pédologique de sol, ces textures s'étalent largement et justifient le calcul à partir des profils distincts et non à partir de moyennes par classe (d'après Saxton *et al.*, 1986).

La distribution des valeurs est comparable avec les valeurs de poids volumique que l'on retrouve dans la littérature, obtenues par des essais sur des échantillons de terrain (Pias, 1970 ; Makasa, 1998 ; Manuwa, 2007) ou des mélanges réalisés en laboratoire (Musy *et al.*, 1991 ; Boussaid, 2005). Cette relation est très importante pour la suite de notre travail car elle permet de restituer cartographiquement le poids volumique à partir des teneurs en sable

et argile que nous estimons à partir de capteurs satellitaires (cf. ch.4.). On peut également lier le poids volumique γ_d à la porosité n par la formulation suivante, qui présente l'intérêt de se déduire directement de la composition texturale du sol (en exprimant γ_d en kN/m^3) :

$$n = \frac{V_v}{V} = 1 - \frac{V_s}{V} = 1 - \frac{W_s}{V} \frac{V_s}{W_s} = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} = 1 - \frac{\gamma_d}{26,8}$$

Les valeurs de porosité des échantillons, varient entre 30 % (arénosols) et 60 % (vertisols), pour une moyenne générale de 45,4%. Ces valeurs théoriques sont légèrement sous-évaluées par rapport à la porosité du matériau en place car une porosité structurale se superpose à ces valeurs texturales (Pias, 1970).

3.5.1.2. Paramètres de la phase liquide

La description quantitative de la phase liquide en terme de caractéristiques relatives repose sur la notion de teneur en eau, qui peut être pondérale (notée ω), ou volumique (notée θ). La teneur en eau naturelle ω d'un sol est le rapport, en pourcentage, du poids d'eau que le sol contient par le poids de ses éléments secs, après dessiccation à l'étuve à 105°C (Amar *et al.*, 1980). La teneur en eau volumique θ est utilisée dans le calcul de bilans hydriques et les modèles d'échanges sol-atmosphère. Ces deux grandeurs sont définies et reliées entre elles par les relations suivantes :

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} (\%) \quad \theta = \frac{V_w}{V} (\%) \quad \omega = \frac{\gamma_w}{\gamma_d} \theta$$

La **teneur en eau naturelle** ω d'un sol exprime le rapport en % du poids d'eau que le sol contient au poids de ses éléments secs. Elle varie entre une valeur minimale, ou résiduelle et une valeur maximale, ou teneur de saturation, en principe égale à la porosité pour les sols minéraux (Musy *et al.*, 1991 ; Duchaufour, 2001). Toutefois, certaines argiles à structure complexe ont la particularité d'adsorber une grande partie de cette eau. Cette adsorption se manifeste sur le paysage tchadien par un phénomène de gonflement observé dans les sols vertiques du nord du massif du Guéra. La proportion d'argile gonflante atteint alors 80% de l'horizon de surface (Pias, 1967) et forme une structure géomorphologique particulière de microreliefs caractéristiques, de type gilgai (cf. annexe 1). La teneur en eau naturelle de ces sols peut alors largement dépasser 100 % (jusqu'à 300% environ).

La **teneur en eau volumique** θ , ou degré d'humidité est une variable d'état complexe qui évolue dans l'espace et dans le temps à toutes les échelles. La représentation analytique de ces interactions est simulée par le biais de modèles de surface continentale ou Land Surface Model (Bonan, 1996) et de circulation atmosphérique (Lin, 2004 ; Bloom *et al.*, 2005). Les évolutions successives de l'architecture de ces modèles ont permis de préciser ces simulations (Ducharne *et al.*, 2000 ; Koster *et al.*, 2000 ; Collins, *et al.*, 2005 ; Gascoin *et al.*, 2008).

Parmi les systèmes existants, nous avons retenu le modèle d'assimilation global GLDAS pour notre problématique. Il corrige les données du capteur radar AMSR-E par un modèle de circulations atmosphérique et intègre les effets de transferts sol-plante-atmosphère, de la constitution du sol et de la topographie dans un modèle de surface continentale (NOAH) validé à l'échelle mondiale.

Le capteur à micro-ondes passives AMSR-E, monté sur les plates-formes satellitaires EOS, enregistre la teneur en eau du sol au pas de temps de 50 minutes, pour une résolution de 25 km. Son évaluation en zone sahélienne par des mesures in situ dans le cadre du projet ALMIP (Gruhier *et al.*, 2007 ; Gruhier *et al.*, 2008) a validé la capacité de ce capteur à reproduire la variabilité temporelle de l'humidité du sol à l'échelle de la saison ou de l'épisode pluvieux, mais pas celle de fournir une valeur absolue (de Rosnay *et al.*, 2005 ; Boone *et al.*, 2006). A partir des valeurs d'humidité estimée par le modèle GLDAS et des valeurs brutes extraites du capteur AMSR-E pour plusieurs localités réparties sur notre zone d'étude, nous avons établi que l'écart entre ces deux estimations est supérieur à 50% (Figure 43).

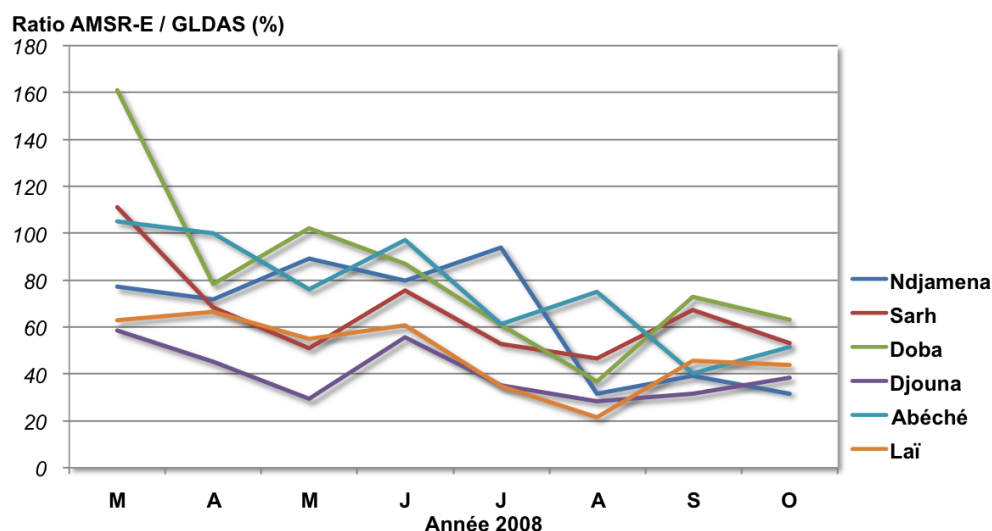


Figure 43 : Comparaison de l'humidité du sol, pour l'horizon superficiel, entre les valeurs brutes du capteur AMSR-E et corrigées par le modèle d'assimilation GLDAS (l'indice 100 % représente la teneur estimée par GLDAS).

Les teneurs ont été calculées pour le premier jour de chaque mois, à 18h, sur 6 localités du Tchad méridional. De manière générale, les faibles teneurs brutes des mois secs sont bien estimées par le capteur AMSR-E mais, au fur et à mesure du développement de la saison des pluies et de l'augmentation progressive de ces teneurs, elles s'écartent des valeurs corrigées, en ayant tendance à les sous évaluer fortement.

Les travaux de Koster *et al.* (2004) ont mis en évidence la difficulté des modèles de surface continentale à estimer correctement l'humidité du sol dans les régions tropicales, où le couplage précipitation-humidité des sols est le plus fort. La principale difficulté provient du paramétrage de l'influence de l'humidité atmosphérique à basse altitude en réaction des événements pluvieux dans les régions à très forte évaporation (Taylor *et al.*, 2005). L'amélioration des modèles d'assimilation actuels porte sur la réduction de cette erreur (Rienecker *et al.*, 2008), notamment par l'intégration de données multipolarisées et multitemporelles issues de capteurs micro-ondes actifs (Moran *et al.*, 2004). C'est le cas du modèle GEOS-5, dont les sorties seront disponibles en 2010.

Nous avons calculé la teneur en eau pondérale des sols du Tchad méridional pour l'horizon supérieur 0-40 cm, sur un cycle de saison complet, de septembre 2007 à septembre 2008, à partir des valeurs d'humidité moyennes mensuelles du modèle d'assimilation GLDAS (Houser *et al.*, 2004) et de la densité apparente des sols (Figure 44). La restitution de cette teneur en eau à 25 km de résolution permet d'apprécier, à une échelle globale, les réactions de l'horizon superficiel du sol face aux aléas météorologiques saisonniers.

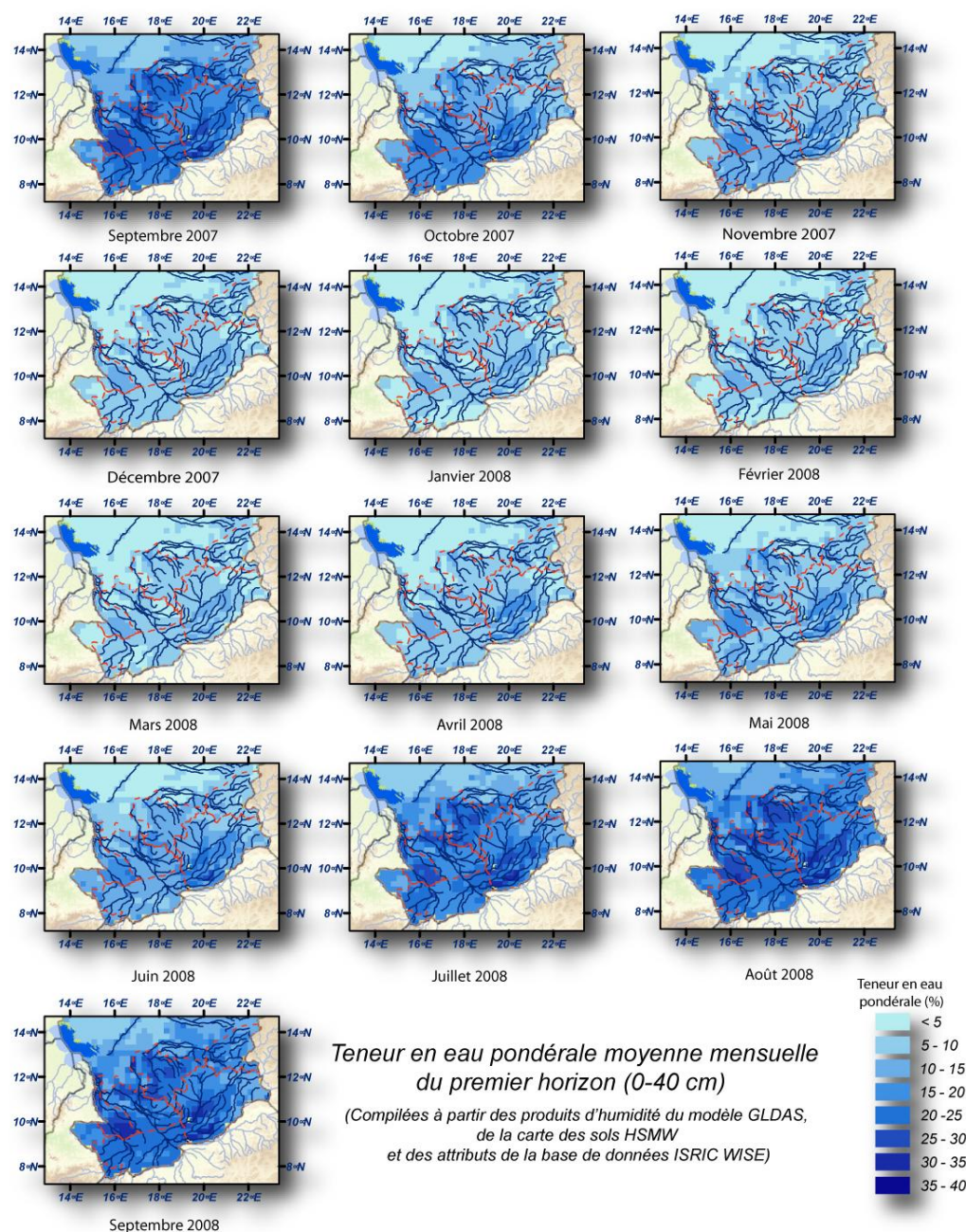


Figure 44 : Evolution de la teneur en eau pondérale moyenne de l'horizon superficiel de septembre 2007 à septembre 2008.

Au retrait du front de mousson, les grands secteurs inondés (plaine et zone de déversement du Logone, dépression du Salamat, lac Fitri) se résorbent entre 2 et 3 mois et stagnent à 6 ou 7 % de teneur en eau durant les quatre mois les plus secs, de décembre à mars. Les zones de relief, Ouaddaï et Guéra, ainsi que la zone sableuse au nord-est de N'Djamena, reçoivent moins de pluie et s'assèchent en moins de 2 mois. Le retour de la saison des pluies est très progressif. Les zones dépressionnaires et argileuses s'humidifient plus vite que les glacis du Mayo Kebbi ou les collines des Koros. Les premiers grains affectent le Salamat dès le mois d'Avril, ainsi que l'extrême sud mais toute la plaine du Haut-Chari reste indifférente à la hausse de débit du fleuve dont les terrasses alluviales ne seront humides qu'environ trois mois plus tard. Au mois de septembre 2008, les sols de la zone Logone-Chari, déjà saturés, sont inondés par le déversement de la rivière, gonflée par les eaux charriées depuis le Cameroun. Le décalage temporel entre les crues et le pic des pluies atteint environ un mois pour cette région. Les déversements successifs du Logone, de Lai à Bongor, amortissent le débit. Il se répand ensuite normalement dans sa plaine d'inondation entre Bongor et N'Djamena.

3.5.2. Classification géotechnique des sols

Le transfert de la classification pédologique vers la nomenclature géotechnique LPC/USCS a pour objectif de permettre une spatialisation des propriétés géomécaniques des sols, à partir de leur identification par imagerie multispectrale. A l'échelle globale, un risque de traficabilité est diagnostiqué à partir des résultats de cette classification et de l'état hydrique des sols. La restitution cartographique de la mesure de traficabilité aux échelles régionales et locales fait l'objet du chapitre suivant.

La classification géotechnique des sols est réalisée à partir de trois essais et calculs d'identification : analyse granulométrique, détermination des limites d'Atterberg et teneur en matières organiques.

3.5.2.1. Analyse granulométrique et texture des sols

L'analyse granulométrique détermine les proportions de grains de différentes tailles dans le sol (Philipponnat *et al.*, 2000), par tamisage pour les grains d'un diamètre supérieur à 80 μm et sédimentométrie pour les grains les plus fins. Le seuil granulométrique entre les sols fins et grenus se situe à 80 μm pour la classification LPC/USCS ce qui correspond au tamis le plus fin utilisé par la dénomination texturale de l'AISS de la classification morphogénétique d'Aubert (1965). Le seuil de 2 mm sépare les sables et les graves.

Nous classons 126 des 244 échantillons dans les sols grenus de la nomenclature LPC/USCS, dont 121 sont des sables argileux (SA). Les 5 échantillons sableux sont bien gradués (Figure 45). La dénomination des 239 échantillons restant est déterminée par leur position sur le diagramme de plasticité (Figure 46). Les graves et sables purs sont absents des échantillons analysés.

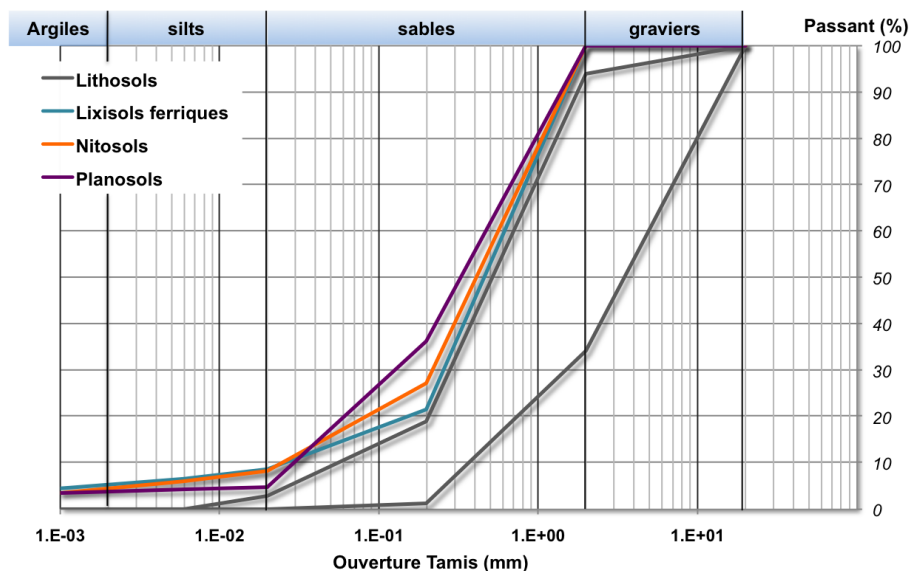


Figure 45 : Courbes granulométriques des échantillons de sol de l'horizon 0-40 cm appartenant à la classe des sols grenus sableux (classification LPC).

Ces 5 échantillons sableux appartiennent à des classes pédologiques diverses (sols minéraux bruts, ferrugineux lessivés, hydromorphes à pseudogley et ferralitiques) mais se localisent tous dans la partie supérieure des profils de glaciers des régions de l'extrême sud du Tchad méridional, Mayo Kebbi et Haut Logone. Les sols plus évolués sont sablo-argileux à argileux.

3.5.2.2. Limites d'Atterberg et activité des argiles

La dénomination des sols fins selon la nomenclature LPC est déterminée par leur position dans le diagramme de plasticité. Les sols sont alors caractérisés selon l'indice de plasticité et la limite de liquidité. La droite $I_p = 0,73 (W_L - 20)$ du diagramme sépare les sols argileux des sols limoneux (Figure 46).

Les limites d'Atterberg définissent conventionnellement les passages entre les états liquide, plastique et solide par une teneur en eau spécifique, obtenue à l'aide d'essais normalisés. La limite de plasticité w_p traduit le passage entre les états solide et plastique, la limite de liquidité w_L entre les états plastique et liquide (Atterberg, 1905). Leur détermination permet d'apprécier le comportement plastique du sol. La limite de retrait qui définit la transition entre l'état solide sans et avec retrait, n'est pas utilisée pour la problématique de traficabilité. L'indice de plasticité est défini par la relation :

$$I_p = w_L - w_p$$

On peut également retrouver par le calcul cet indice, car les limites d'Atterberg sont spécifiques de la nature et de la composition chimique de l'argile (Cornell University, 1951). Les limites de liquidité et de plasticité de l'échantillon de sol total se calculent à partir de la proportion et de l'activité des argiles.

95% des échantillons de vertisols, gleysols et de sols halomorphes (solonetz et solonchaks) que nous avons analysés (Figure 47) appartiennent à la catégorie des argiles très plastiques et ce, quelle que soit la proportion de fraction argileuse. Ces valeurs s'expliquent par une très forte teneur en argiles actives (montmorillonite calcique, calco-sodique à sodique pour les sols halomorphes), dont les limites de liquidité dépassent 500% du fait de leur forte capacité d'adsorption (Cornell University, 1951).

La fraction argileuse des sols tchadiens superficiels ($< 2\mu\text{m}$) contient une part importante de kaolinite, toujours en association avec 10 à 15 % d'illite, issues de l'altération du socle felsique granitique et gneissique. Le développement de conditions hydromorphes au-dessus du niveau de Gley des sols des plaines alluviales du Logone et du Chari a transformé une part importante des smectites originelles en kaolinite (Pias, 1962; Pacharnet *et al.*, 1996). La plasticité des planosols de la plaine du Logone et des lixisols est proportionnelle à la fraction de fines dont les argiles inactives (Skempton, 1953) sont majoritaires, entre 70 et 80% pour les Planosols et 55 à 70 % pour les lixisols.

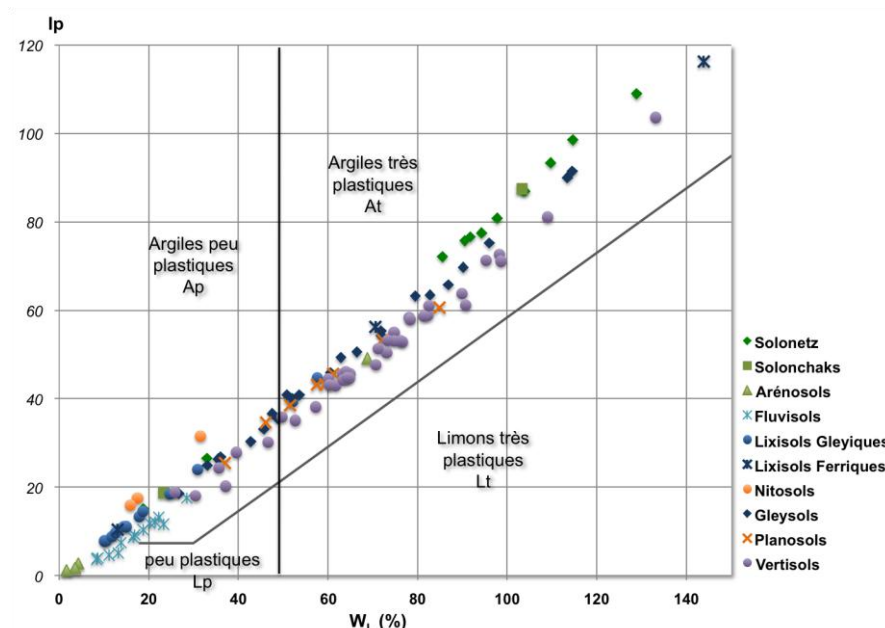


Figure 46 : Plasticité des sols fins du Tchad méridional (classification LPC)

Seuls les sols fins (dont la fraction argileuse est supérieure à 50%) sont représentés sur ce diagramme. Il confirme la nature exclusivement argileuse des horizons de surface des sols fins du Tchad méridional. La distribution des valeurs démontre l'impossibilité du transfert systématique des échantillons entre les classifications pédologiques et géotechniques dans leur globalité. Le partitionnement de ces échantillons selon les unités de sols définis en partie 4 permet de réaliser ces transferts.

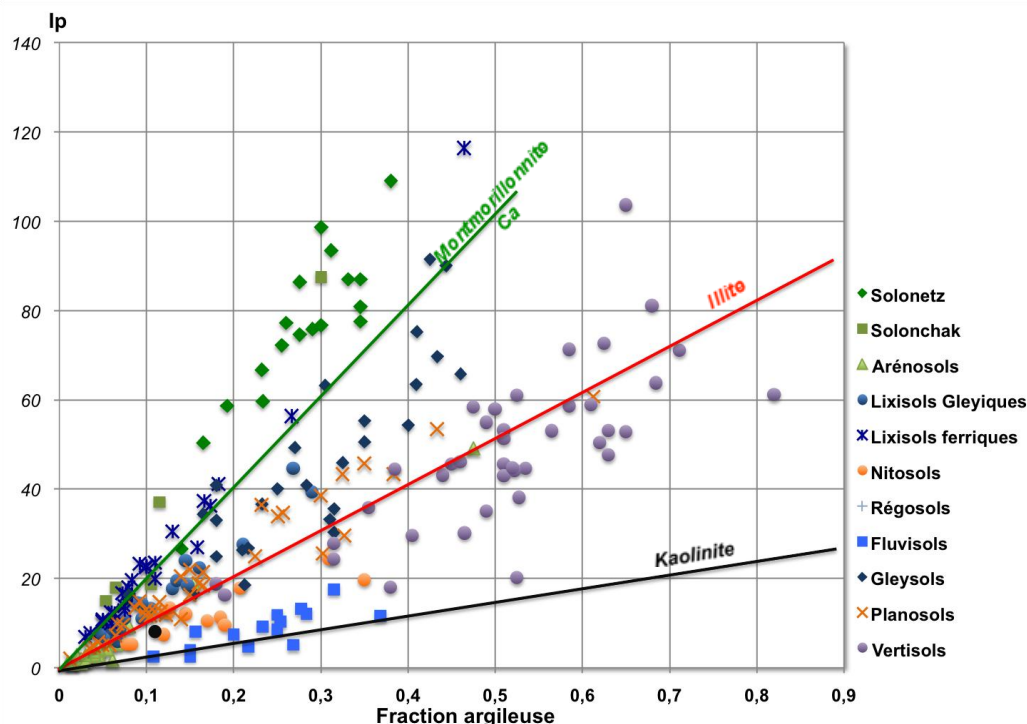


Figure 47 : Indice de plasticité de l'horizon superficiel des sols du Tchad méridional, en fonction de la fraction argileuse.

La plasticité des vertisols s'aligne avec la droite de corrélation de l'illite par un ratio Kaolinite/Montmorillonite compris entre 3 et 4. L'inclinaison particulière des solonetz sur ce diagramme tient au caractère sodique des montmorillonites composant ces sols, dont la plasticité est 1,2 fois supérieure à celle des montmorillonites calciques (Cornell University, 1951).

3.5.2.3. Résultat de la classification géotechnique des sols du Tchad méridional

La synthèse des analyses granulométriques et de la détermination des limites d'Atterberg nous ont permis de décrire les échantillons issus de profils pédologiques par une dénomination géotechnique LPC/USCS. La matière organique ne dépasse jamais 3% de la masse totale. Ces dénominations correspondent à une organisation spécifique de la structure solide du sol, dont le comportement mécanique évoluera dans un cadre connu, pour un état hydrique donné (Amar *et al.*, 1980 ; LCPC-SETRA, 1992 ; Boussaid, 2005).

Les sols du Tchad méridional se répartissent à 97% dans les classes des argiles peu et très plastiques et dans celles des sables argileux (Figure 48). En revanche, aucun sol pédologique n'est spécifique d'une seule classe géotechnique (Figure 49). La corrélation des caractéristiques pédologiques et géotechniques ne peut donc pas être systématique. Cependant, on observe que les sols ne se répartissent pas de manière équitable dans chacune des classes :

- gleysols, vertisols et solonetz appartiennent majoritairement aux argiles très plastiques ;
- fluvisols et lxisols gleyiques aux argiles peu plastiques ;
- nitosols, arénosols, lxisols ferriques et planosols aux sables argileux.

Les lithosols et régosols, respectivement sableux bien gradués (Sb) et sablo-argileux bien gradués (Sb-SA) ne sont pas représentés sur ces diagrammes, en raison du faible nombre d'échantillons.

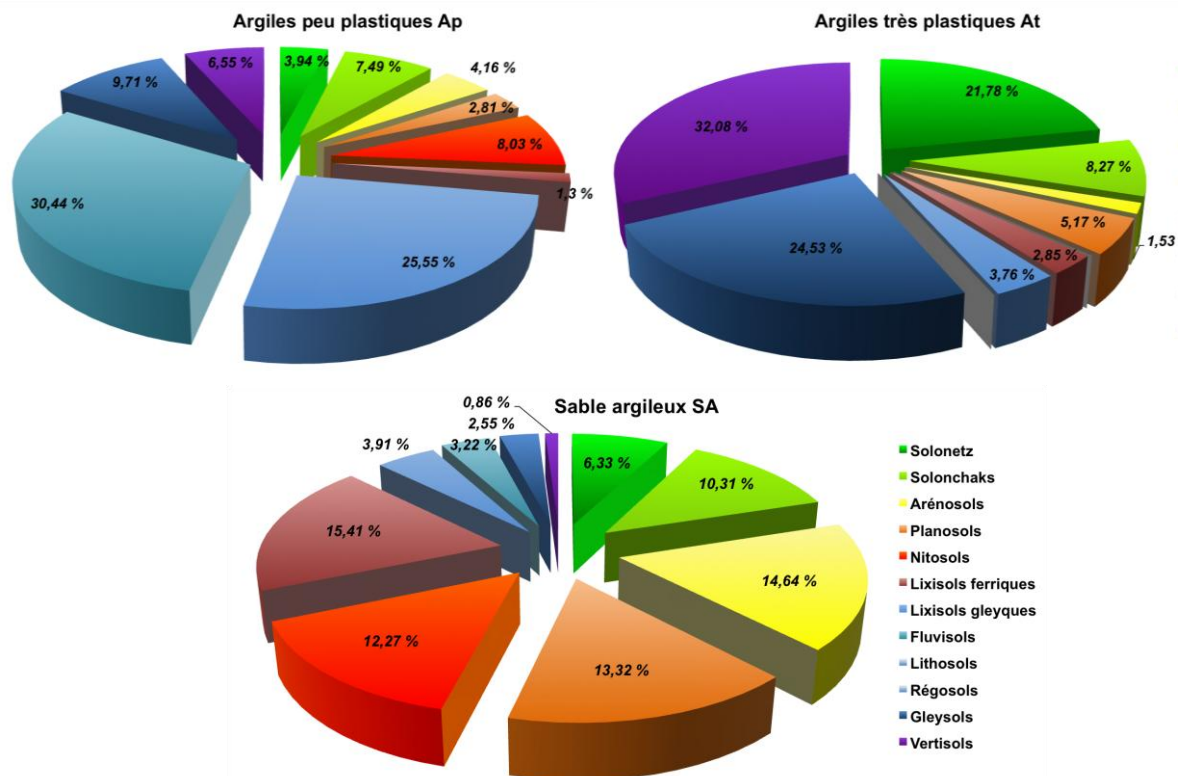


Figure 48 : Distribution pondérée des classes LPC de l'horizon superficiel des sols du Tchad méridional

En replaçant chacun de ces échantillons dans leur contexte géomorphologique et géographique, nous avons pu reconstituer des faciès types d'une unité pédoclimatique :

- les gleysols et vertisols de la plaine du Salamat sont exclusivement des argiles très plastiques, alors que dans la plaine du Logone, ces sols sont peu plastiques ;
- les fluvisols sablo-argileux proviennent exclusivement du Logone et du Chari. Dans les oueds de l'Ouaddaï, ces sols sont sablo-argileux.
- les nitosols argileux se retrouvent uniquement dans les contreforts du Mayo Kebbi. Ils sont sablo-argileux dans la région des Koros ;

Toutefois, les sols halomorphes, solonetz et solonchaks ne semblent pas suivre cette répartition et deux faciès de compositions très différentes sont souvent adjacents.

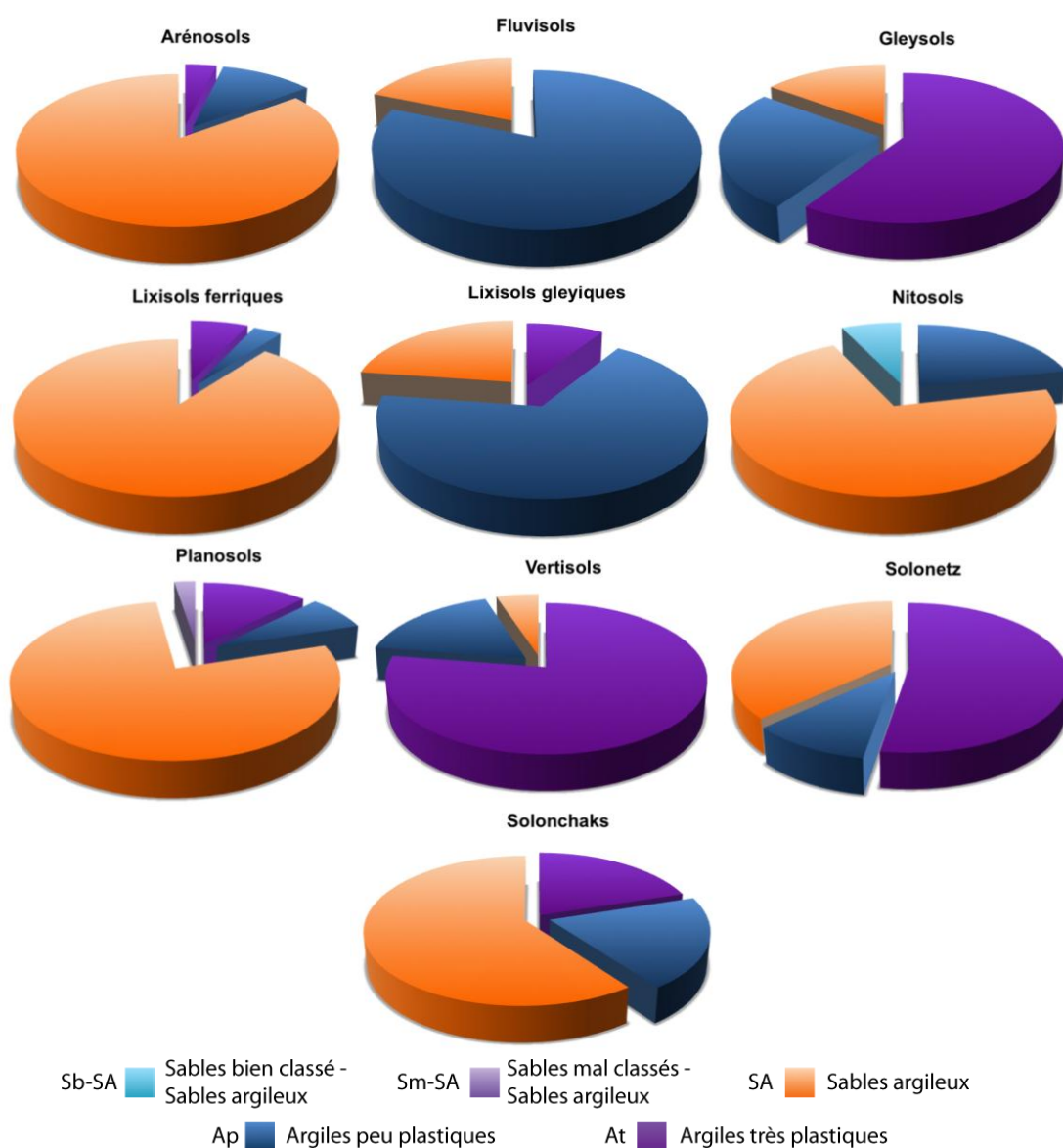


Figure 49 : Répartition des classes LPC des sols en fonction de leur appartenance pédologique

3.6. Synthèse et perspectives

Dans le cas du Tchad méridional, nous retenons de l'étude du sol et de son environnement les points suivants :

- le relief n'est pas un facteur majeur dans la problématique de traficabilité sur notre zone d'étude. Les dénivelés sont faibles, à l'exception de pitons rocheux très localisés dans le massif du Guéra, à l'Ouaddaï et en bordure centrafricaine. Le microrelief existe mais son importance ne peut pas être évaluée quantitativement, en raison du manque de sources potentielles. L'impact portera plutôt sur les diagnostics locaux ;
- le climat du Tchad méridional est contrôlé par la migration du front de mousson. Plus on se rapproche de l'Equateur, plus la saison des pluies se rallonge et moins les orages précoces sont violents. En revanche, la prévision de la durée et de l'intensité de la mousson à partir des indicateurs de pluies (journalières, grains précoces, tendances en début de saison) est très difficile et incertaine. Enfin, le comportement de la saison des pluies est très variable d'une année sur l'autre, même si l'on observe une nette diminution des précipitations depuis une dizaine d'année ;
- les résultats des corrélations ont démontré que la prise en compte du contexte pédoclimatique permet une classification satisfaisante des sols selon la nomenclature géotechnique LPC. Le caractère géotechnique des sols du Tchad méridional n'est en effet pas directement déductible de leur seul caractère morphogénétique global. La reconnaissance de ces sols à partir d'imagerie multispectrale nous impose ce partitionnement géographique, réduit à la fauchée de l'image. La classification géotechnique des sols sera ainsi déduite des caractéristiques pédologiques identifiées sur l'image (cf ch4).

A partir de ces résultats, nous avons appliqué les résultats des corrélations pédo-géotechniques à la cartographie pédologique de la FAO. Elle est découpée en unités cartographiques, au sein desquelles les analyses et proportions de chaque sol sont indépendantes. En fonction de la teneur en eau pondérale et de la classe géotechnique de l'unité de sol donnée, nous avons établi une cartographie de risque de praticabilité *a priori* (Figure 50) à l'échelle globale. Ces cartes sont calculées au pas de temps mensuel et montrent les variations saisonnières du comportement mécanique des sols. Elles fournissent un premier outil de localisation des régions à risques, sur lesquelles une analyse à plus grande échelle est requise.

Dans l'idéal, ces régions à risques devraient être étudiée à partir d'images multispectrales de début, milieu et de fin de saison des pluies de l'année en cours, pour caractériser l'évolution de la végétation. Si cet idéal est envisageable à l'horizon 2013 (grâce aux satellites LDCM et Sentinel 2), il est très difficile à atteindre aujourd'hui. Le suivi de l'évolution d'une région par imagerie radar pendant toute la saison des pluies permettrait de fournir un diagnostic local de l'évolution de l'humidité des sols et de l'étendue des inondations.

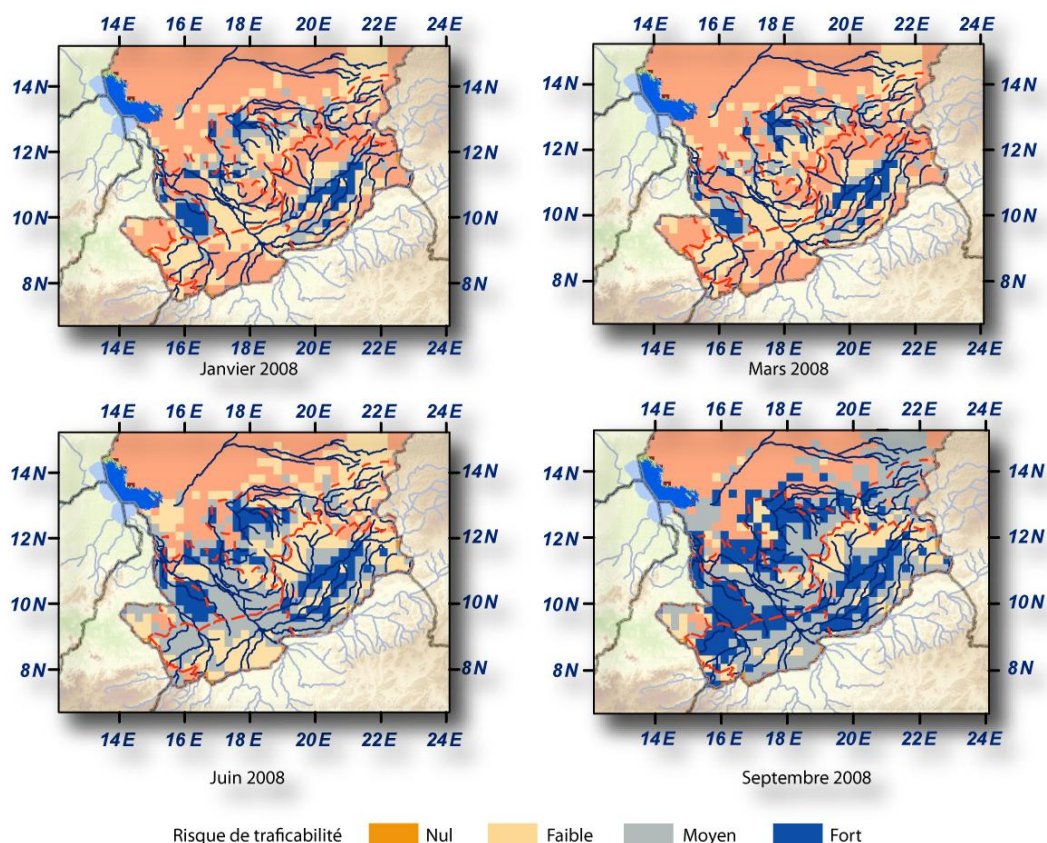


Figure 50 : Cartes des risques potentiels de praticabilité du Tchad méridional pour les mois de janvier, mars, juin et septembre 2008 établies à partir de la classe géotechniques du sol et sa teneur en eau pondérale .

Pour les sols intermédiaires, le risque croît progressivement en fonction de l'humidité (nul < 10%, faible de 10 à 15%, moyen de 15 à 20%, fort > 20%). Pour les sols argileux, le risque croît rapidement avec l'augmentation de l'humidité (faible < 10%, moyen de 10 à 15%, fort > 15%). Les sols sableux purs présentent toujours un risque de praticabilité nul.

Les traitements que nous avons développés sur le Tchad méridional ont été réalisés en partie avec des images d'archives. Ces images ne sont ni actuelles (2000 à 2002 pour les images Landsat), ni de saison idéale (les images Quickbird sont souvent de pleine saison sèche). Le chapitre suivant détaille ces traitements, nos constructions méthodologiques de combinaison de ces archives avec des images acquises en temps réel pour restituer une cartographie dynamique de l'occupation du sol, et la synthèse des résultats, qui aboutissent au diagnostic de traficabilité.

Cartographie de l'occupation et de l'humidité du sol par imagerie multispectrale multi-échelle et restitution de la traficabilité

Nous avons proposé une approche de l'estimation spatiale de traficabilité à partir de trois échelles d'analyse et de restitution cartographique. Cette approche s'appuie sur l'interprétation de l'imagerie satellitaire pour la spatialisation des informations.

L'étude du sol et de ses constituants présentée au chapitre précédent a permis de corrélérer les données pédologiques et la classification géotechnique LPC des sols. A partir de ces informations et des données d'humidité du sol du modèle GLDAS, nous sommes arrivés à une première restitution, à l'échelle du pays.

Les cartes de traficabilité aux échelles régionales et locales se décomposent en trois couches d'informations. Deux de ces couches, traficabilité tout-terrain, et obstacles, s'appuient sur l'interprétation de l'imagerie satellitaire. La praticabilité des axes est formulée à partir du réseau routier et des précipitations. Le principal défi soulevé par cette approche concerne la spatialisation de la résistance et de l'humidité du sol à ces deux échelles.

Cette approche est développée en 4 parties :

- la première partie présente les résultats de l'extraction de l'occupation du sol par imagerie Landsat et MODIS. Chaque type de surface est extrait individuellement par une méthode spécifique. Nous avons veillé à rendre la majorité des processus automatiques, ainsi qu'à proposer des méthodes adaptables et valides sur tout le territoire du Tchad méridional ;
- l'extraction de l'occupation du sol à l'échelle inframétrique fait l'objet de la seconde partie. Nous avons développé une méthodologie à partir d'imagerie Quickbird disponible sur le globe virtuel Google Earth ;
- la troisième partie concerne la cartographie de l'humidité des sols à partir d'imagerie radar THR TerraSAR-X. Nous avons testé la sensibilité du capteur à l'humidité des sols pour différentes configurations de polarisation et de résolution, en multi-dates. Nous avons également testé la capacité inframétrique de ce capteur pour la détection des pistes et de leur humidité ;
- la quatrième partie combine les résultats des trois précédentes séries d'analyse, pour présenter une restitution cartographique de la traficabilité. Cette analyse est testée sur trois régions.

4.1. Extraction de l'occupation du sol thématique à partir des capteurs optiques Moyenne et Basse Résolution

A l'échelle régionale, nous avons établi la cartographie d'une occupation du sol thématique, à partir de l'interprétation de deux capteurs multispectraux à moyenne et basse résolution : Landsat 7 ETM+ et MODIS. Cette cartographie est réalisée par une approche spécifique pour chacun des paramètres de terrain recherchés. Les processus mis en place tirent ainsi parti de la complémentarité technique et opérationnelle de ces deux capteurs.

D'autres solutions auraient pu être envisagées (basées sur MERIS pour la basse résolution, sur ASTER ; SPOT ou d'autres capteurs pour la moyenne résolution). Le choix des capteurs est dicté par l'adéquation des données fournies au problème et par leur disponibilité et la continuité prévue de fourniture des services associés dans le futur.

Le capteur Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) enregistre sept bandes de fréquences dans les spectres optiques (visible et infrarouge ; 0,4 à 2,6 μm) et thermique (10 à 14 μm) (Figure 51). Les images ont une fauchée de 185 km (Irish, 1998). La résolution au sol est de 28,5m pour les bandes spectrales optiques (1, 2, 3, 4, 5 et 7), à l'exception de la bande panchromatique (bande 8, 14,25 m). Landsat 7 a été lancé en avril 1999. Sa mission est de fournir une couverture cohérente des surfaces continentales pour des applications centrées sur les phénomènes terrestres et de leur évolution. Une couverture mondiale, orthorectifiée et quasiment sans nuage a été réalisée et mise à disposition en ligne, sans restriction d'utilisation, cependant non homogène au niveau des dates de prise de vue. La couverture de l'intégralité de la surface du Tchad méridional, objet de notre étude, nécessite 23 images. Elles en constituent les données de base.

L'instrument MODIS (MODerate résolution Imaging Spectrometer) enregistre 36 fréquences spectrales, du visible au thermique (NSIDC, 2002). Le spectre optique est couvert par les sept premières bandes du capteur (Figure 51). Six d'entre elles se superposent avec les bandes spectrales de l'instrument ETM+. Installé sur le couple de satellite TERRA et AQUA et avec une fauchée de 3500 km le capteur MODIS a une répétitivité quotidienne. Sa résolution au nadir est de 300 m. Ces propriétés ont amené au développement de produits algorithmiques multispectraux, intégrés à la production en temps réel des chaînes de traitements du capteur. Ces produits sont disponibles et mis à jour quotidiennement sur les serveurs de la NASA.

Le développement méthodologique d'extraction de l'occupation du sol s'est focalisé sur le bassin hydrographique du Logone. Cette région combine, d'une part, un réel problème d'enclavement en saison humide et, d'autre part, une variabilité des sols représentative des plaines d'inondation des zones sahéliennes. La période de transition entre les phases d'inondation et d'assèchement de la plaine est une saison clé pour l'analyse de traficabilité.

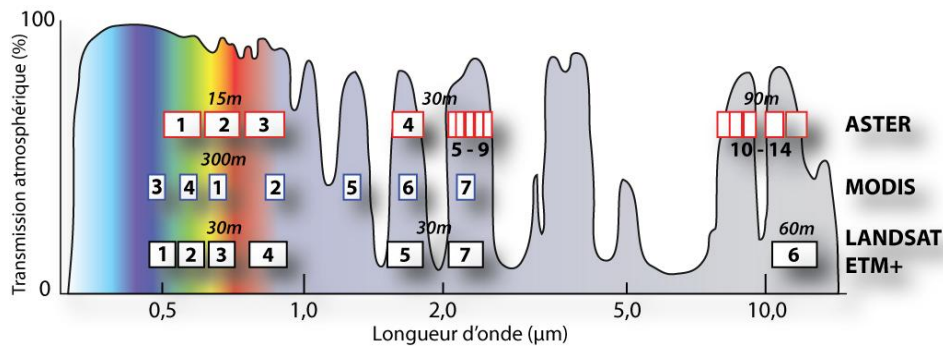


Figure 51 : Bandes d'absorption des capteurs Landsat ETM+, MODIS et ASTER, d'après Kääb et al. (2002), modifié

Le recouvrement des bandes d'absorption des capteurs autorise la transposition des interprétations ainsi que de toutes les méthodologies basées sur des indices spectraux. Les bandes spectrales du capteur MODIS sont de largeur constante, soit 50 nm. Seules les fréquences spécifiques de l'observation des surfaces terrestres dans le visible et le proche infra-rouge sont représentées sur ce schéma (7 sur 36).

4.1.1. Cartographie des sols

L'identification de la répartition spatiale des sols constitue la partie statique du modèle de traficabilité. Elle est réalisée à partir de l'interprétation d'images multispectrales par une combinaison de trois indices spectraux. Ils permettront de discriminer les sols à partir de leurs propriétés physiques et spectrales. Leur dénomination dans la classification LPC/USCS sera ensuite déduite de la combinaison de ces trois indices.

4.1.1.1. Propriétés spectrales des sols

Dans les spectres du visible et de l'infrarouge, l'interaction du rayonnement solaire avec les constituants du sol se mesure par la réflectance. Les nombreux travaux de cartographie des sols et de leur état de surface par imagerie multispectrale ont mis en évidence l'influence de certaines propriétés spectrales sur la réflectance du sol (Bonn *et al.*, 1996) :

- la **couleur** de la surface exprime qualitativement un ensemble de propriétés (Escadafal, Girard *et al.*, 1988 ; Escadafal, 1993) : rouge pour une forte teneur en fer, noire pour une valeur élevée en matière organique (Kermanov, 1970). Dans les longueurs d'onde « visible », la signature spectrale d'un sol se relie à sa couleur Munsell (Courault *et al.*, 1988). Sur l'ensemble du spectre optique, la clarté augmente avec la réflectance du sol (Girard *et al.*, 1999). L'indice de couleur est établi par le rapport des bandes rouge et verte (Pouget *et al.*, 1991) ;
- la **pierrosité** représente la proportion relative d'éléments grossiers supérieurs à 2 mm. Une pierrosité importante augmente la réflectance des sols dans toute la gamme spectrale du visible à l'infrarouge (Aubron, 1993 ; Boulahouat *et al.*, 1996 ; Michot, *et al.*, 2007). En effet, les surfaces des éléments grossiers agissent comme des surfaces spéculaires ;
- la **teneur en CaCO_3** d'un sol. Son augmentation tend à accentuer la brillance du sol (Ben-Dor *et al.*, 1994) du fait d'une forte réflectance dans le spectre du visible et l'infrarouge proche (Courault, 1989 ; Escadafal, 1994). Cet effet s'inverse dans le moyen infrarouge par une forte absorption sur les longueurs d'onde 2,3-2,35 μm

(bandes 7 du capteur ETM+) (Hunt *et al.* 1971), y compris pour les sols dont la nature de la fraction argileuse est carbonatée (Makhamreh, 2006) ;

- une forte **teneur en matière organique** fait diminuer la réflectance sur l'ensemble du domaine spectral optique (Daniel *et al.*, 2004). Le maximum de sensibilité est obtenu sur la longueur d'onde 0,675 μm (rouge du spectre visible pour la bande 3 du capteur ETM+ ; Al-Abbas *et al.*, 1972 ; Krishnan, *et al.*, 1980 ; He, Wang *et al.*, 2008) ;
- la **teneur en oxyde de fer**. Lorsqu'elle est inférieure à 20%, elle diminue la réflectance (Nanni *et al.*, 2001). Ce phénomène s'inverse pour de fortes teneurs, dans les bandes infrarouges proches (Courault, 1989). En effet, les deux formes minéralogiques les plus courantes d'oxydes ferriques (hématite et goéthite) absorbent les longueurs d'ondes 0,5 et 0,85 μm (bandes 2-4 du capteur ETM+). Madeira-Netto (1993,1996) en déduit un indice de rougeur ou indice d'hématite et un indice ferrique, élaborés à partir des trois premiers canaux Landsat TM.
- une forte **rugosité** diminue la réflectance des sols clairs sur tout le spectre optique (Yongcharlarmchai, 1993). Par un double effet d'auto-ombrage et de diffusion multiple, les surfaces rugueuses faiblement contrastées s'opposent aux surfaces lisses (Escadafal *et al.*, 1987) ;
- l'augmentation de **l'humidité** diminue la réflectance des sols de manière continue sur tout le spectre optique. Cette diminution sera importante pour les sols argileux et faible pour les sols sableux, en particulier pour les longueurs d'onde supérieures à 2 μm (King, 1985). Les pics d'absorption de l'activité du groupement hydroxyle se situent à 1,4 et 1,9 μm pour l'eau libre et capillaire, et à 1,05, 1,25 et 2,2 μm pour l'eau adsorbée (Stoner *et al.*, 1981). Le quartz est inactif par rapport à l'eau. La **nature granulométrique** se déduit par la différence de sensibilité des sols à la présence d'eau dans le spectre infrarouge.

4.1.1.2. Approche méthodologique et préparation des données de référence

4.1.1.2.1. Choix des indices

En adaptant ces propriétés au Tchad méridional (Figure 52), nous proposons de discriminer les sols à partir de la combinaison des trois indices spectraux suivants :

- un **indice granulométrique (ratio des bandes spectrales Landsat ETM+ 5/7)** à partir duquel sont déduites les proportions absolues en sable, silt, et argile. Cet indice est largement utilisé dans la cartographie satellitaire des sols en zone aride (Escadafal *et al.*, 1995 ; Mougenot *et al.*, 1995 ; Hadoubane *et al.*, 2002) ;
- un **indice de kaolinite (5/1)**. Il se corrèle à l'indice précédent pour les sols simples des régions sahéliennes, représentés par les régosols de cuirasses et sables éoliens dunaires (Houssa *et al.*, 1996). Pour les sols intermédiaires (mixtes sables-argiles), très largement majoritaires au Tchad méridional (cf. ch. 4), nous montrerons que cet indice est très bien corrélé avec la teneur en kaolinite. Par ailleurs, il constitue l'un des éléments de la combinaison de Sultan (Sultan *et al.*, 1986), communément utilisée pour la cartographie des altérations superficielles en zone tropicale (Inzana *et al.*, 2003) et aride (Abdeen *et al.*, 2001) ;

- un **indice d'humidité (4/3)**, dérivé de l'indice Vegetation-Soil-Water Index (Sugita *et al.*, 1996; Yamagata, *et al.*, 1997), permet la différenciation des sols humides des sols secs. Dans la plaine du Logone, les sols secs correspondent aux planosols et sols ferrugineux. L'humidité apparente des sols hydromorphes reste visible jusque vers fin novembre.

De plus, le calcul de ces indices présente trois intérêts complémentaires :

- une estimation de la teneur absolue en sable et argile des sols. Elle permet ainsi le calcul des paramètres de porosité et de densité apparente (cf. ch. 3) sur la totalité de l'image. On en déduit alors une saturation du sol à la résolution de l'image, soit 28,5 m. Cette même saturation, déduite des bases de données pédologiques de la FAO, se limitait à 25 km ;
- ces indices s'appliquent à toutes les images issues du même capteur. Les indices minimisent les décalages des valeurs absolues induits par les écarts de saison entre deux images adjacentes.
- l'utilisation d'indices dans le domaine infrarouge permet de s'affranchir de l'effet induit par la patine des roches et des sols des régions arides (Bothorel, 1983). La faible pénétration du signal, environ 50 μm pour les longueurs d'onde comprises entre 1,1 et 2,6 μm (Bukingham *et al.*, 1983), est ainsi suffisante.

Les valeurs de sable, silts, argile et kaolinite sont extraites des analyses pédologiques (ch3). La corrélation entre ces valeurs moyenne et les réponses spectrales des sols en surface n'est possible que par une très faible évolution de ces valeurs sur l'épaisseur de profil considérée (40cm).

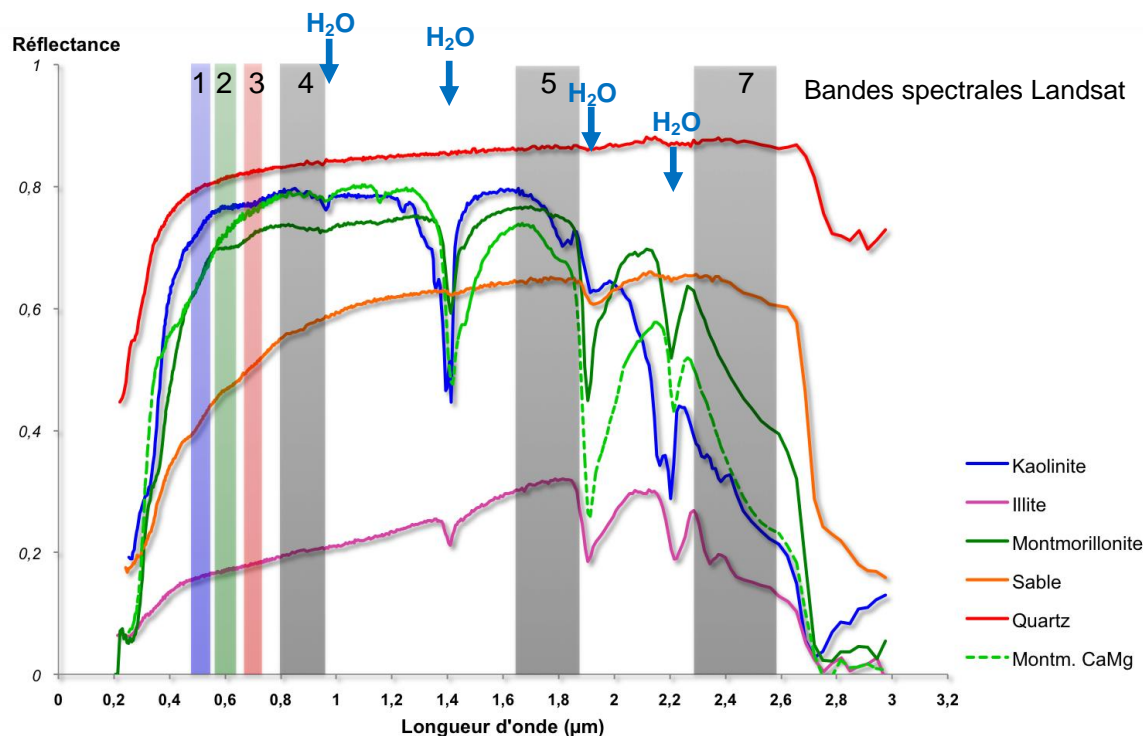


Figure 52 : Courbes spectrales types des réflectances des composants des sols du Tchad méridional, dans le domaine optique

La sensibilité des argiles à la présence d'eau se manifeste sur les courbes spectrales par une nette diminution de la réflectance au-delà de la longueur d'onde 2 μm . Entre les bandes spectrales 5 et 7 du capteur ETM+, le rapport énergétique entre les argiles et le sable s'inverse.

4.1.1.2.2. Calibration radiométrique

Les images Landsat 7 ETM+ dont nous disposons sont orthorectifiées et de niveau 1G. La conversion des valeurs de pixel de l'image en valeur de luminance L_λ est réalisée en utilisant les coefficients de l'équation (Markham *et al.*, 1997) :

$$L_\lambda = \frac{L_{\lambda \max} - L_{\lambda \min}}{255} \cdot \text{pixel} + L_{\lambda \min} \quad (W / m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$$

$L_{\lambda \max}$ et $L_{\lambda \min}$ correspondent aux valeurs totales de luminance pour chaque bande aux valeurs de pixel maximale et minimale.

Chaque bande est corrigée par une fonction linéaire correspondante :

Bande	Correction
1	1,176*pixel -6,2
2	1,205*pixel-6,4
3	0,934*pixel-5
5	0,19*pixel-1
7	0,066*pixel-0,35

Tableau 3 : Coefficients de correction radiométrique appliqués à l'image Landsat ETM+ de la plaine du Logone (d'après Markham *et al.*, 1997)

4.1.1.2.3. Contexte géographique de la zone test initiale

La méthodologie de reconnaissance des sols à partir de la combinaison de trois indices spectraux est testée initialement à la région amont de la plaine d'inondation entre la rivière Logone et le fleuve Chari. Elle est ensuite appliquée aux images adjacentes, afin d'évaluer la cohérence des estimations. La portée de l'interprétation à d'autres régions pédoclimatiques fait l'objet du chapitre 5.

Le cours du Logone est légèrement surélevé d'une trentaine de mètres par rapport au Chari. Sa rive gauche est bordée par un escarpement de cuirasses ferrugineuses du Mayo Kebbi. A l'arrivée des crues, au mois de juillet, le Logone déborde et se déverse dans une grande plaine (0,008% de pente en moyenne). Les bras de l'ancien delta du Chari s'étendent du Logone vers le Ba-Illi en rubans exondés de planosols (sols hydromorphes à pseudogleys). Entre les réseaux méandriformes du Chari se développent des vertisols. Ils présentent localement un caractère halomorphique.

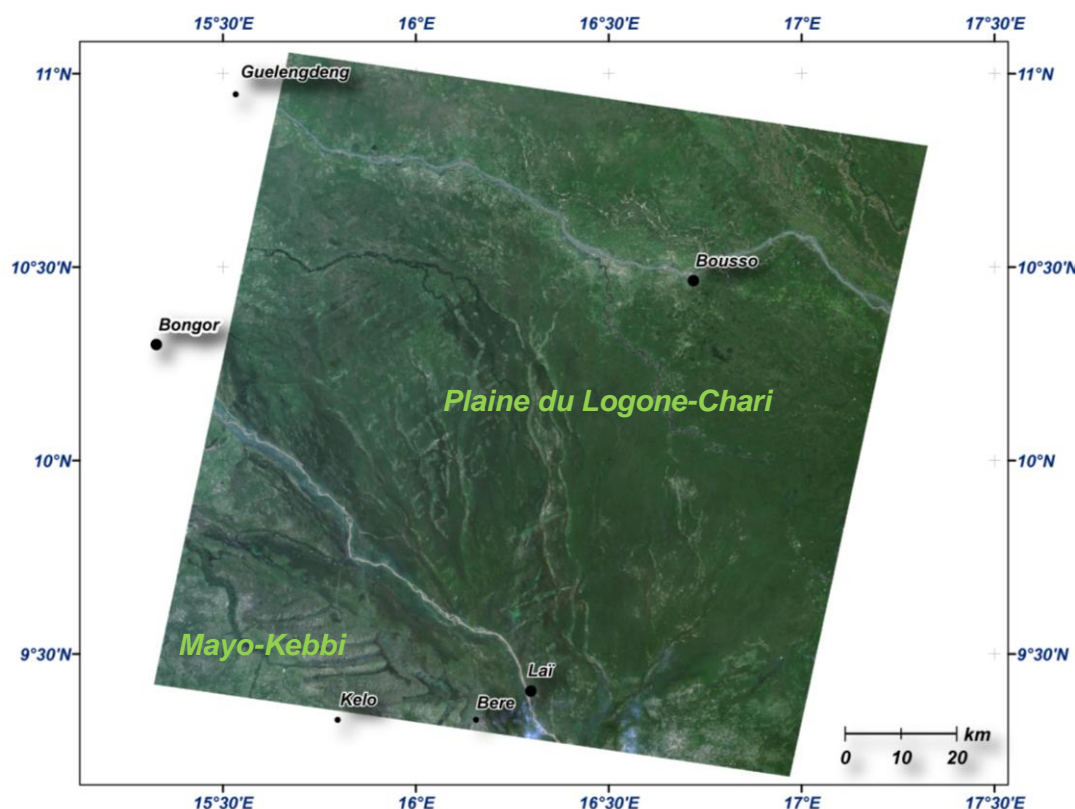


Figure 53 : Composition en vraies couleurs de l'image Landsat ETM+ du 28 Septembre 2001

Le contraste entre les sols du plateau du Mayo Kebbi et la plaine souligne les buttes exondées et décharnées qui s'étirent entre Laï (au Sud) et le Chari (au Nord). Les régions violacées correspondent à des surfaces de sols nus hydromorphes légèrement organiques. Le halo blanc des rives du Chari est caractéristique des surfaces agricoles après récolte.

L'image multispectrale Landsat date du 28 septembre 2001 (Figure 53) et correspond à la fin de la saison des pluies. Cette période de l'année rassemble les meilleures conditions d'observation de la plaine :

- la couverture végétale et agricole, encore importante, permet de disposer d'une image contrastée ;
- les zones inondées sont réduites ;
- les brûlis des prairies n'ont pas encore commencé.

4.1.1.2.4. Base de référence spatiale pédologique

La base de référence spatiale est élaborée à partir de l'harmonisation des cartes pédologiques régionales au 200 000^e (cf chapitre 3). Les valeurs des proportions en argile, silt et sable, ainsi que la proportion en kaolinite sont extraites des profils pédologiques pour l'horizon 0 – 40 cm. Ces profils sont localisés avec une précision de l'ordre de 50 m sur l'image (Figure 54). La moyenne statistique de ces variables est attribuée à chaque classe harmonisée.

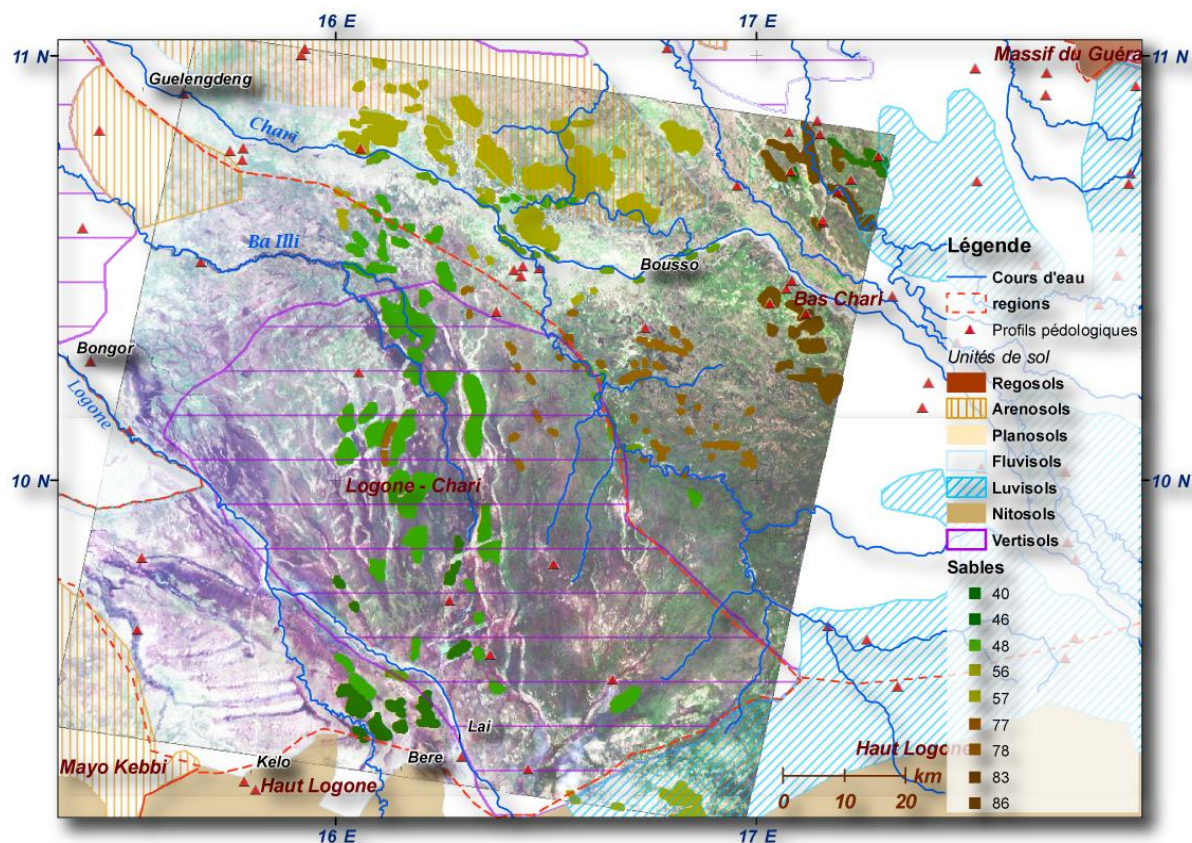


Figure 54 : Répartition des valeurs moyennes des proportions en sable, synthétisées à partir des cartes pédologiques régionales.

Les informations des profils pédologiques sont extraites et synthétisées des notices des cartes pédologiques de Laï, Fianga, Bongor et Bousso. Ces données ne sont disponibles qu'à l'Est du 16e parallèle. Bien qu'irrégulièrement réparties sur le paysage, les classes pédologiques sont représentées chacune par au moins cinq échantillons.

4.1.1.3. Extraction des propriétés physiques des sols par combinaison d'indices spectraux

4.1.1.3.1. Indice 5/7

La fonction de corrélation entre la valeur du ratio 5/7 et les proportions en sable, silt et argile se décompose en deux d'étapes :

- la première étape consiste à extraire les couples de (valeurs - nature granulométrique) à leur position géographique (X,Y), jusqu'à atteindre 20% du nombre total de pixels de l'image (environ 1 870 000). La quantité de pixels sélectionnés est strictement proportionnelle à l'aire théorique occupée par chaque classe pédologique sur l'image. La distribution des valeurs d'indice en fonction de la nature granulométrique suit une loi normale. La valeur moyenne de cet indice est donc approchée par un ajustement normal, pour chaque teneur en sable. La régression linéaire de cette valeur par la proportion de sable donne une première approximation de la fonction de corrélation. Le processus est ensuite répété pour chaque teneur en argile ;

- la seconde étape compare les valeurs exactes des proportions de sable, silt et argile, extraites de chaque profil indépendamment, aux localisations précises où l'échantillonnage a été réalisé. La surface couverte par l'image Landsat sélectionnée, soit près de 35000 km², compte 30 profils.

La corrélation entre les valeurs d'indices (5/7) et la nature granulométrique des sols de la plaine selon une régression linéaire est satisfaisante (Figure 55, Figure 56).

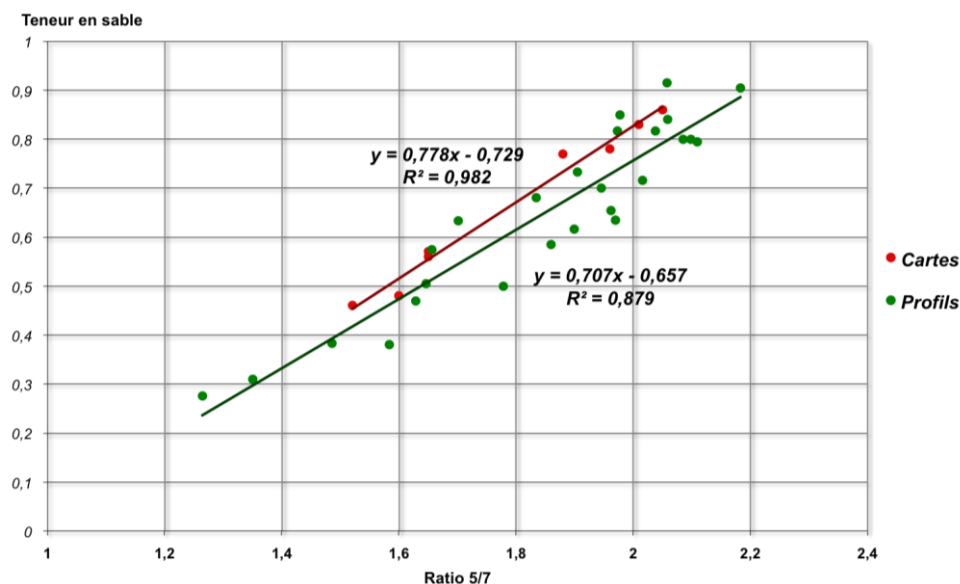


Figure 55 : Corrélation entre les valeurs de l'indice 5/7 et les teneurs en sable

Les coefficients directeurs des équations des droites de corrélation se décalent légèrement en fonction de la méthode d'échantillonnage employée. Les sols du Tchad méridional étant majoritairement sableux, la moyenne des valeurs de texture par classe a tendance à surestimer la proportion en sable des sols de la plaine.

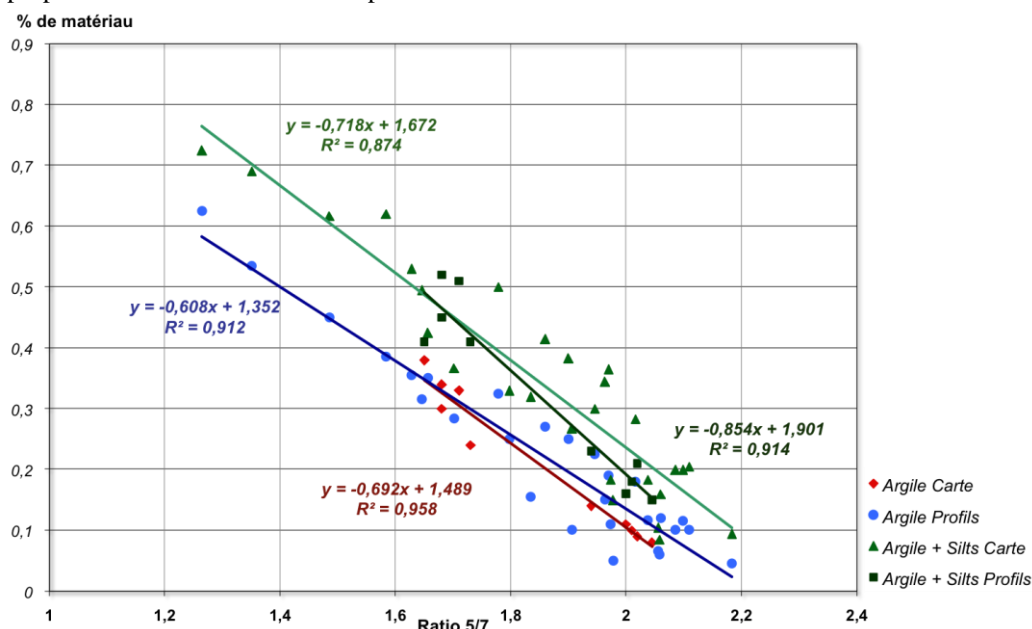


Figure 56 : Corrélation entre les valeurs de l'indice 5/7 et les teneurs en argile et argile + silt

L'estimation des proportions en argile et silt est calculée au-dessus du point d'intersection des deux droites par la droite de corrélation issue des profils et, au-dessous, par la droite de corrélation issue des moyennes des sols. Cette double corrélation évite ainsi une surestimation des teneurs en argile pour les valeurs d'indice les plus faibles.

En utilisant ces corrélations pour transposer les valeurs d'indices en estimations de sable, silt et argile, nous obtenons une restitution spatiale de la texture des sols (Figure 57).

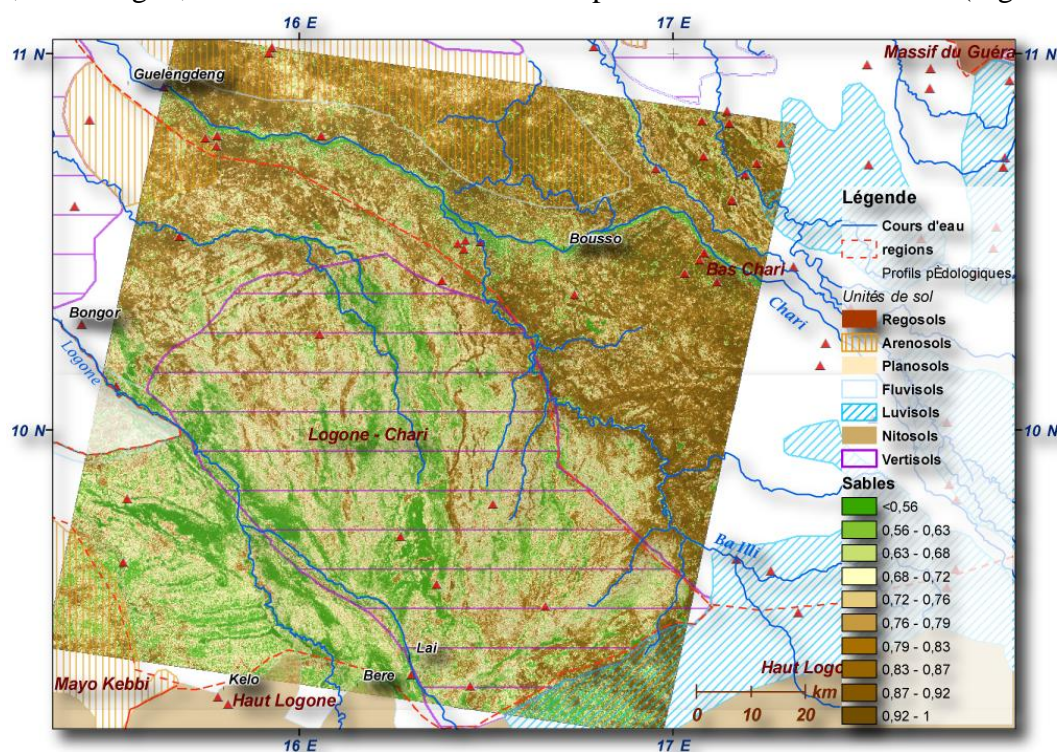


Figure 57 : Répartition spatiale des teneurs en sable, calculées à partir de l'indice 5/7, classées par déciles (en fond, carte pédologique FAO)

Les planosols des buttes exondées, très sableux, contrastent avec les sols hydromorphes du centre de la plaine, argilo-silteux. La région entre le Ba-Illi et le Chari apparaît sableuse parsemée de zones argileuses. Elle traduit l'alternance de petites dépressions occupées par des vertisols au sein de planosols.

4.1.1.3.2. Indice 5/1

Les teneurs en kaolinite sont extraites des analyses chimiques des échantillons, par profil pédologique. Nous avons constaté qu'elle se corrélait avec l'indice 5/1 par une fonction puissance (Figure 58). Pour les sols des Koros et du delta du Chari, les teneurs sont toujours inférieures à 10% de la composition granulométrique du sol total. Elles sont très proches des valeurs de référence (écart type inférieur à 0,01). En revanche, les fortes teneurs (>30% de kaolinite) sont sous-estimées par la fonction de corrélation. Les valeurs de l'indice inférieures à 0,5 soulignent les sols très argileux dont les teneurs en kaolinite sont très variables (de 30 à 57%). La transformation de l'indice 5/1 par cette fonction puissance fournit une représentation spatiale de l'estimation de la teneur en kaolinite totale contenue dans un volume de sol (Figure 59).

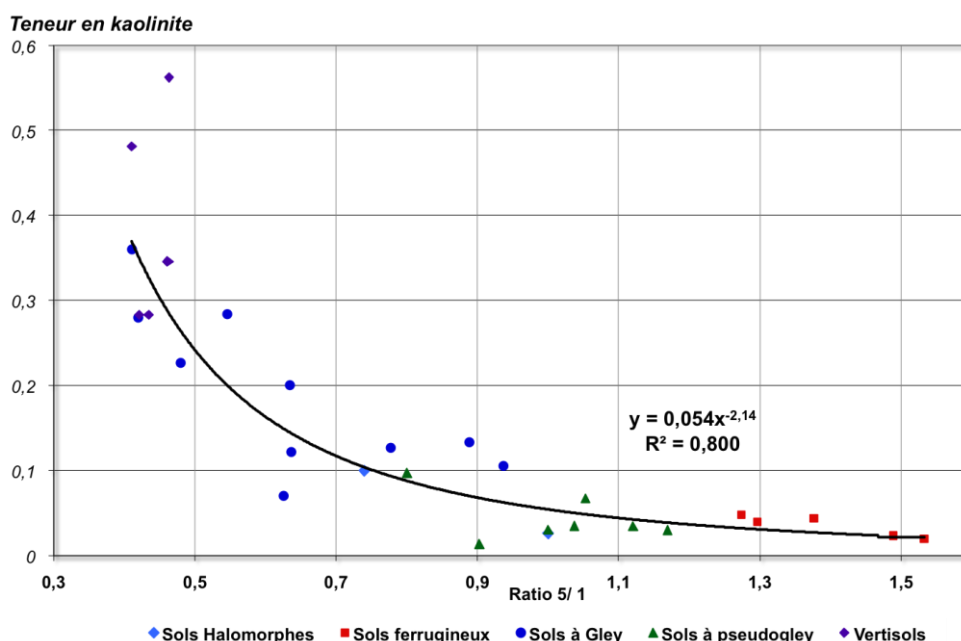


Figure 58 : Corrélation entre les teneurs en kaolinite et les valeurs de l'indice 5/1
Les sols sableux sont caractérisés par une teneur en kaolinite toujours inférieure à 10% et une valeur d'indice supérieure à 0,8. Les teneurs des sols hydromorphes, au delà de 10%, sont décorrélées de leur nature granulométrique.

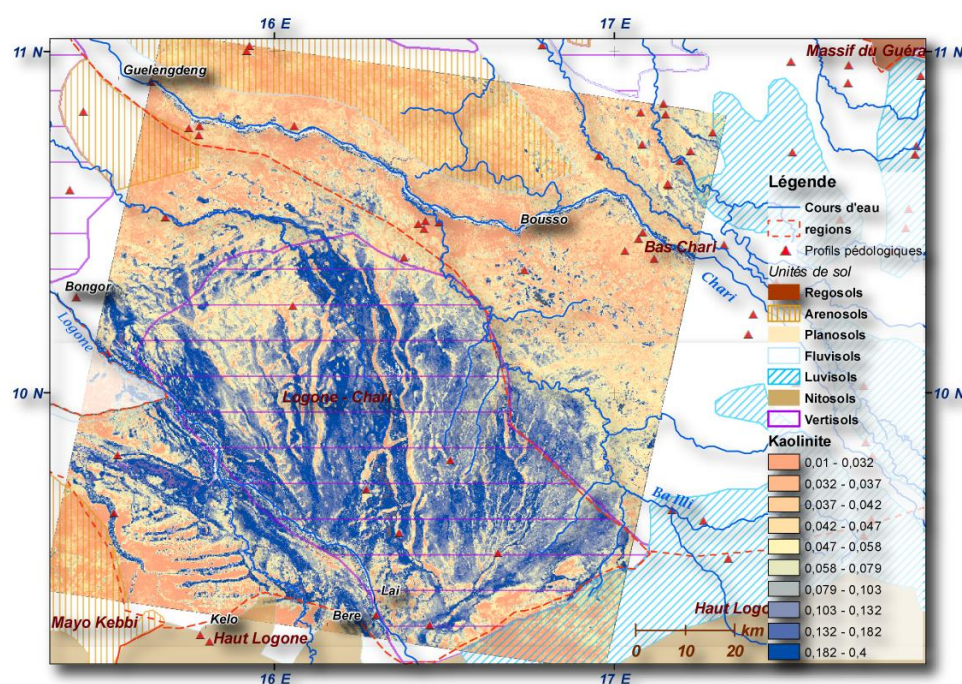


Figure 59 : Répartition spatiale des teneurs en kaolinite calculées à partir de l'indice 5/1.
(En fond, carte pédologique FAO) 80% des teneurs en kaolinite, classées par déciles, est comprise entre 3 et 18 %. Les fortes valeurs, peu représentées, sont donc assez locales.

4.1.1.3.3. Indice 4/3

Au retrait de l'inondation, les sols argileux conservent leur humidité et se couvrent d'une végétation dense. Ils contrastent avec les sols sableux exondés des buttes deltaïques, des Koros et des rives du Chari (Figure 60), bien drainés .

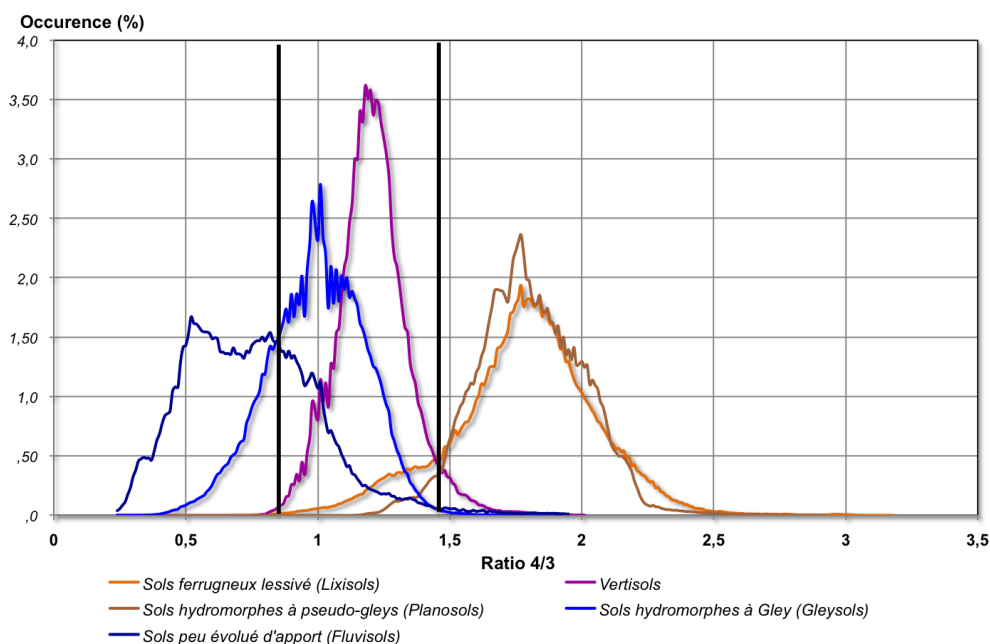


Figure 60 : Distribution des valeurs de l'indice 4/3 par type de sols

Le seuil d'indice 1,47 sépare les sols exondés des sols ferrugineux et hydromorphes. Tous les sols exondés se caractérisent par une valeur d'indice supérieure à 1,47. Les valeurs des fluvisols se rapprochent de celle de l'eau libre (0,47) par un effet de mixage de pixels. La séparation des fluvisols et gleysols est fixée à 0,72.

4.1.1.4. Conclusions

La composition colorée issue de ces trois indices sépare deux domaines distincts, sur lesquels domine l'association sols argileux humides - sols sableux sec (Tableau 4 :). La discrimination des sols est obtenue par la combinaison matricielle de ces trois indices. Pour chacun d'eux, les deux seuils logiques les plus discriminants sont définis. Ils assurent une séparation entre deux classes supérieures à 95%.

	Humidité	Kaolinite	Sable
Seuils	<0,6 (1)	<0,1 (1)	< 0,45 (1)
	>0,6 et <1,47 (2)	>0,1 et <0,3 (2)	>0,45 et <0,8 (2)
	>1,47 (3)	>0,3 (3)	>0,8 (3)

Tableau 4 : Seuils de discrimination des valeurs d'humidité (indice 4/3 transformé), de teneur en kaolinite (indice 5/1 transformé) et de proportion en sable (indice 5/7 transformé).

Sur les 27 combinaisons théoriques qu'offre cette matrice, seules 13 sont rencontrées sur l'image. Elles sont présentées dans le tableau 5.

La correspondance avec la classification LPC/USCS (Figure 61, et cf. ch3) est réalisée directement à partir des classes pédologiques lorsque celles-ci appartiennent à une catégorie unique. C'est le cas des fluvisols, gleysols et vertisols. La dénomination des autres classes prend en considération les caractéristiques granulométriques et la teneur en kaolinite.

Combinaison	Classe pédologique	Classe LPC/USCS
131, 132, 113	Fluvisols	SA
222, 211	Gleysols	At
231, 223, 232	Vertisols	At
313, 312, 213	Planosols, Lixisols,	Ap
322, 212	Planosols, sols halomorphes	SA
111, 112, 121, 122, 123, 133, 221, 233, 311, 323, 321, 331, 332, 333	Non représentés	

Tableau 5 : Attribution des combinaisons d'indices aux classes pédologiques et correspondances avec la classification LPC/USCS.

Les sols de la plaine de déversement du Logone se situent donc tous dans la catégorie des sols fins ou sableux avec fines, plus ou moins plastiques (Tableau 5).

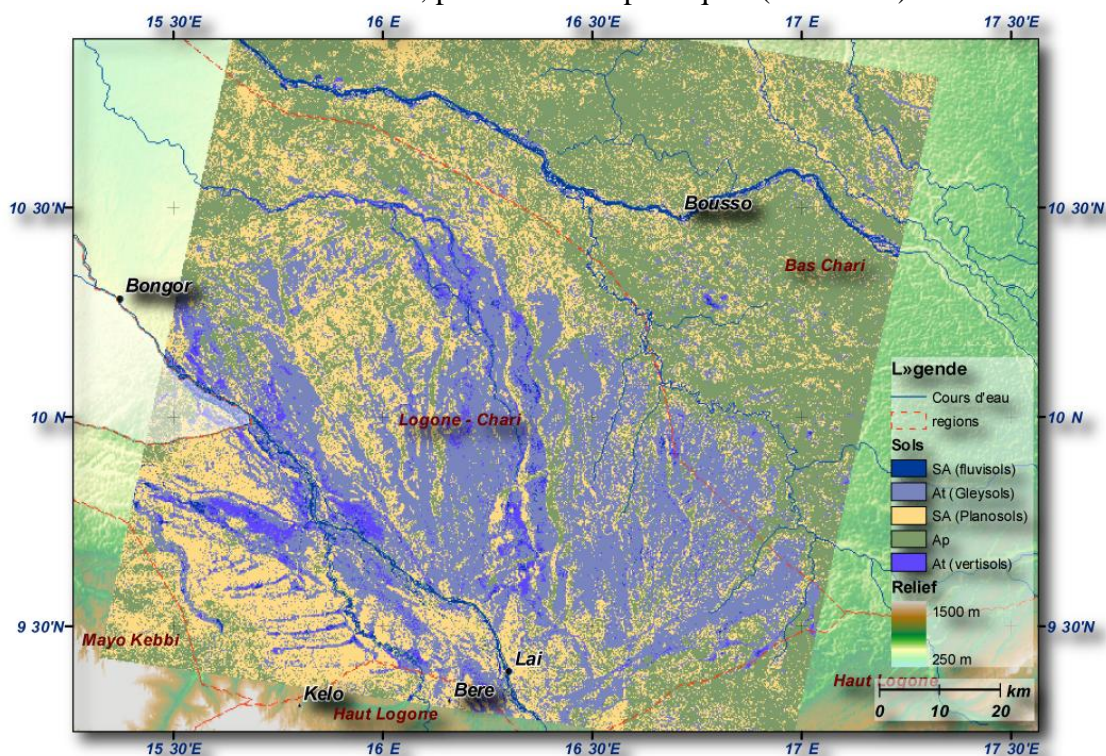


Figure 61 : Cartographie des sols selon la classification LPC/USCS (en fond, SRTM3)

4.1.1.5. Validation quantitative

La validation quantitative des résultats ne porte que sur l'indice granulométrique, car les deux autres indices dépendent de paramètres spatiaux ou temporels :

- les proportions de kaolinite peuvent varier pour un même type de sol selon les régions pédoclimatiques considérées (cf. chapitre 3) ;
- les propriétés colorimétriques sont relatives à la date de prise de vue de l'image et des sols présents. Dans le spectre visible, le fort pouvoir réflecteur du quartz des terrains sableux nus et les surfaces de brûlis de saison sèche renvoient un histogramme des contrastes très étroit (Bardinet *et al.*, 1979, 1985). Dans l'infrarouge, l'activité chlorophyllienne est très évolutive dans la saison, avec un pic d'intensité à la fin de la saison humide, mais cette activité est liée à la migration de la ZCIT, variable d'une année sur l'autre (Poccard *et al.*, 1996).

Deux critères valident les estimations de l'indice granulométrique :

- le calcul de l'écart de la somme des estimations en sable, silt et argile par rapport à la somme théorique de 1 (ou 100%) ;
- le report de cet indice sur les images Landsat adjacentes.

Sur l'image de la zone de Laï, les proportions estimées varient entre 0,99 et 1,043 avec une valeur moyenne de 1,017 (Figure 62). Cette faible erreur s'explique par la sous-représentation des échantillons argileux par rapport aux sols sableux. La relation entre la nature granulométrique et l'indice 5/7, considérée uniformément linéaire, change de comportement au niveau des extrêmes. Un nombre complémentaire de points de référence permettrait de préciser les paramètres de cette régression aux limites.

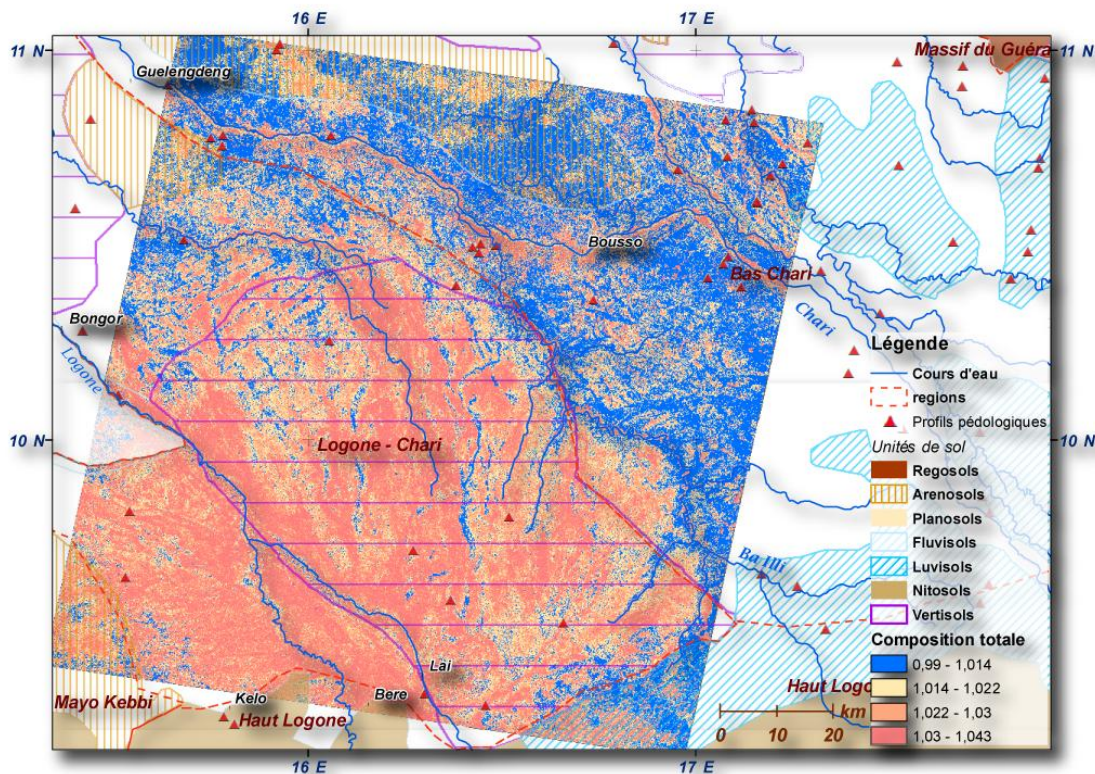


Figure 62 : Somme des estimations des proportions en sable, silt et argile
(en fond, carte pédologique FAO)

Les zones légèrement surestimées par rapport à la moyenne, en rouge, correspondent principalement aux sols argilo-silteux, et aux rives des rivières et du fleuve. Sur ces zones marécageuses, le mélange d'informations liées à la présence de petites surfaces d'eau libre altère le signal.

Les estimations de teneur en sable ont été comparées à leurs valeurs de référence, issues des échantillons (Figure 63). L'erreur quadratique moyenne de ces estimations, considérées non biaisées, est de 0,14 pour 30 points.

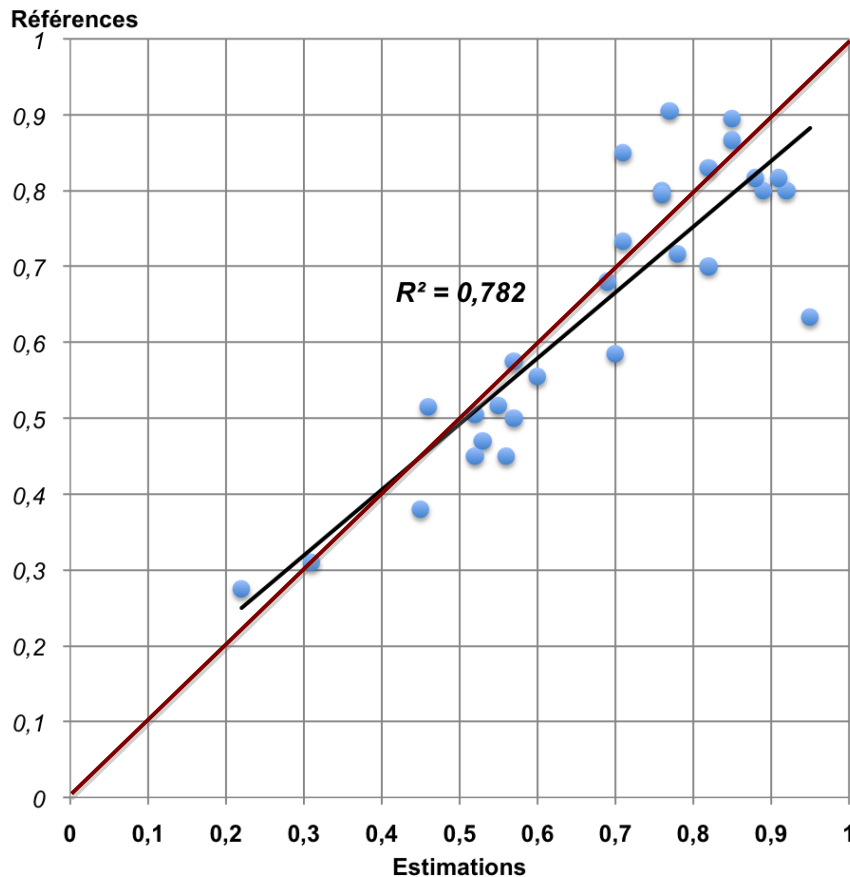


Figure 63 : Corrélation entre les estimations de la teneur en sable et les valeurs de référence

Les échantillons les plus sableux, au delà de 80%, sont systématiquement sous estimés, alors qu'entre 35 et 50%, ils sont légèrement surestimés. Ces erreurs n'ont aucun impact sur la caractérisation géotechnique de ces surfaces car, malgré ces écarts, elles ne changent pas de catégories, et conservent les mêmes conditions d'utilisation géotechnique.

Les estimations de sables ont été calculées sur quatre images Landsat adjacentes (Figure 64). Les deux images de la trace ouest sont datées du 21 octobre 2001, celles de l'est, du 28 septembre 1999. A cause d'une forte différence de contraste entre les deux traces, les erreurs d'estimations peuvent être importantes si l'on procède à un simple rapport des deux bandes d'absorption. Le calcul mis en place dans cette étude fait intervenir la différence entre les valeurs de pixel du premier décile et du dernier décile. Les écarts d'estimation entre ces deux traces sont ainsi inférieurs à 0,05 (5%).

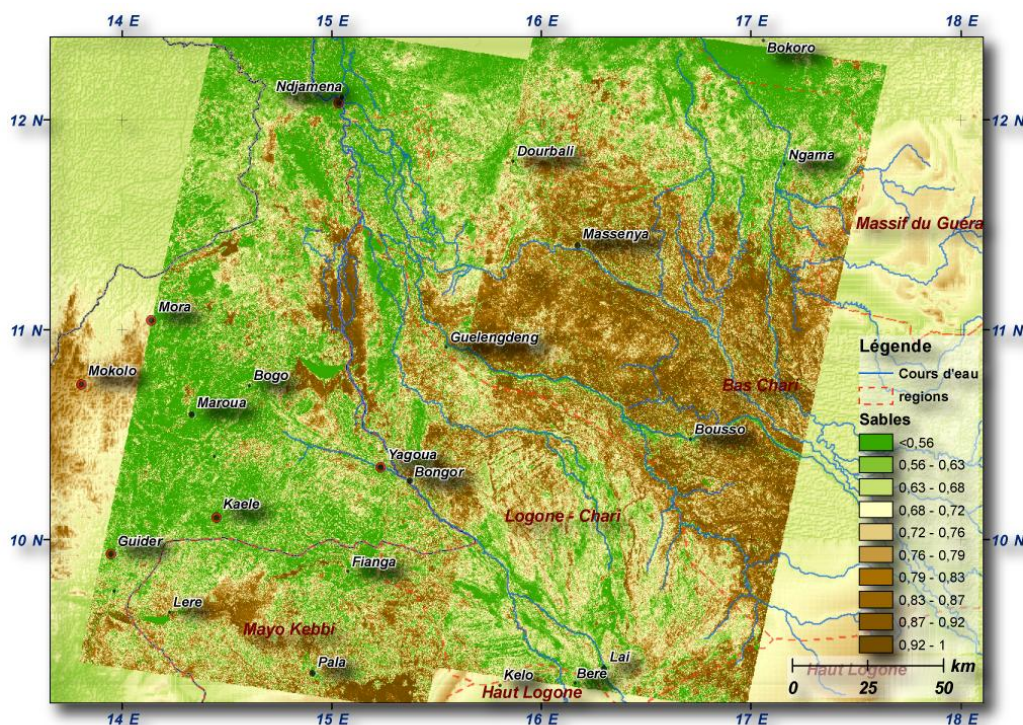


Figure 64 : Estimation de la teneur absolue en sable sur 4 images Landsat (fond topographique issue des données SRTM3) Ces estimations sont réalisées à partir d'une même droite de corrélation. La prise en compte de points de référence complémentaires sur ces images et la connaissance de la répartition des sols dans ces régions, notamment au nord Cameroun, permettrait d'affiner cette corrélation. Les écarts d'estimation entre deux images adjacentes issues d'une même trace sont nuls.

4.1.2. Végétation

Une caractérisation idéale de la végétation par imagerie mutispectrale pour la problématique de traficabilité répondrait favorablement à trois objectifs :

- la **différenciation des biomes** : zone de culture, savanes, prairies et zones marécageuses. Pour la traficabilité des véhicules à roues, on suppose que le franchissement de zones agricoles doit être évité, excepté après la récolte, lorsque le sol est nu. Parallèlement, les grandes herbes des savanes et des zones marécageuses posent des problèmes de visibilité, mais pas de franchissement. En saison sèche, la pratique du brulis pas toujours maîtrisée, élimine une grande partie des végétaux et rend alors ces terrains praticables ;
- la **densité de la biomasse végétale**, pour en déduire une densité racinaire moyenne. Une forte densité de racines renforce la cohésion et la portance des sols humides.
- la **densité d'arbres et d'arbustes**. Les bosquets et broussailles constituent un obstacle naturel infranchissable.

Nous proposons, pour répondre à ces objectifs, une approche double :

- d'une part, **une analyse phénologique** de la couverture végétale au cours de l'année 2008 par un indice de végétation ;
- d'autre part, une **estimation de la densité de la couverture arborescente et arbustive** annuelle. Cette densité est supposée statique à moyen terme (2 à 5 ans). Cette hypothèse sera vérifiée par une analyse de cette couverture pour les années 2001 et 2005.

4.1.2.1. Propriétés spectrales des végétaux

Les propriétés optiques des feuilles dans les longueurs d'ondes du visible sont liées à la composition, la concentration et la distribution des pigments de la chlorophylle (Bariou *et al.*, 1985; Devineau, 1990). Les bandes d'absorption de la chlorophylle se recouvrent partiellement entre elles, dans les longueurs d'onde du bleu, à 450 nm, et du rouge, vers 650 nm (Gates *et al.*, 1965). Ce recouvrement imparfait induit une réflectance plus élevée dans le vert.

Dans le proche infrarouge (0,73 à 1,20 μm), les ondes électromagnétiques sont pour l'essentiel transmises ou réfléchies. Les mécanismes de photosynthèse des végétaux se manifestent dans ce domaine spectral (Jensen, 2005). Dans l'infrarouge moyen (1,3 à 2,5 μm), l'absorption est principalement due à l'eau de constitution des tissus végétaux. De ces propriétés découlent deux conséquences majeures : la réponse spectrale dans le proche infrarouge est liée positivement à la biomasse végétale, la réflectance dans le rouge l'est de façon négative (Tucker C. J., 1979). C'est sur ces fondements que repose la détermination radiométrique du recouvrement végétal et de la surface foliaire (Jordan, 1969). La plupart des indices de végétation ont ainsi été développés à cet effet.

4.1.2.2. Indices de végétation

L'indice de végétation recherché doit satisfaire favorablement un certain nombre de critères :

- permettre la discrimination des biomes de la plaine, et notamment de la végétation sénescente ;
- être sensible aux propriétés biophysiques des plantes et notamment à leur croissance ;
- être normalisé et peu sensible aux facteurs externes (incidence, paramètres atmosphériques) ;
- minimiser les effets des facteurs internes (topographie et pédologie) ;
- se coupler à des paramètres biophysiques mesurables comme la biomasse et l'indice de surface foliaire (LAI).

Pour y répondre, un grand nombre d'indices ont été développés. Il en existe actuellement plus de 200. Les plus communs sont détaillées dans les ouvrages généraux de référence en télédétection (Sabins, 1996; Girard *et al.* 1999 ; Rencz, 1999 ; Jensen, 2005 ; Lillesand, *et al.* 2007).

Parmi ces indices, l'Enhanced Vegetation Index (EVI), proposé par Huete *et al.*, (1994), rassemble les qualités requises pour l'analyse phénologique de la zone d'étude. Il apporte une amélioration importante par rapport au Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) en réduisant l'influence du sol sur la réponse spectrale de la végétation.

L'inclusion, dans sa formule, d'un canal spectral bleu corrigé des effets atmosphériques (diffusion Rayleigh et absorption de l'ozone), minimise l'influence des aérosols sur le canal rouge (Huete *et al.*, 2002). L'EVI montre également une dépendance forte face à l'architecture de la canopée et à ses variations structurales. Il est ainsi fortement corrélé avec le LAI.

Développé initialement pour le capteur Landsat TM, l'EVI est intégré aux produits de végétation issus du capteur MODIS (Huete *et al.*, 1997). Il est calculé pour une série temporelle de 16 jours, pour trois niveaux de résolution : 1 km et 500 m et 250 m (Huete *et al.*, 1999).

Ce service est disponible depuis juin 2003 et a été utilisé dans de nombreuses études sur la phénologie des zones tropicales. Les formules du NDVI et de l'EVI s'écrivent :

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad EVI = 2,5 \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{1 + \rho_{NIR} + 6\rho_{RED} - 7,5\rho_{BLUE}}$$

Le comportement phénologique de la végétation en zone tropicale est dirigé par les précipitations et l'humidité saisonnière (Martiniano de Oliveira Silveira *et al.*, 2008). Les fortes valeurs de l'indice NDVI et EVI de la saison humide correspondent à une importante activité photosynthétique et une accumulation de la biomasse (Ratana *et al.*, 2006). Cependant, les études menées à l'échelle régionale en zone subtropicale montre un décalage du dynamisme de l'EVI. En effet, les fortes valeurs apparaissent décalées en fin de saison sèche et en début de saison humide (Xiao, Hagen *et al.*, 2006). Elles traduisent une indépendance de la phénologie des forêts primaires tropicales avec la saisonnalité des précipitations (Kaurivi *et al.*, 2003). Ces observations ont mis en évidence les zones de transformations de forêt tropicale en cultures par différence de phénologie entre les surfaces végétales (Huete *et al.*, 2008).

4.1.2.3. Etude phénologique

4.1.2.3.1. Calibration des données

Les caractéristiques phénologiques des paysages de la plaine du Logone sont étudiées sur l'année 2008 à partir des grilles de végétation EVI et NDVI du capteur MODIS à 250 m de résolution. Les calibrations radiométriques et corrections spécifiques en vol du capteur sacrifient la valeur absolue de ces indices aux dépends de leur continuité pluriannuelle. La source Landsat constitue une source de référence fiable pour étalonner ces indices sur la zone d'étude. Acquise le 28 septembre 2001, son équivalent issu du capteur MODIS est donc extrait des archives du serveur de la NASA. Une vingtaine de points répartis aléatoirement sur l'image Landsat sont sélectionnés pour calibrer les deux indices (Figure 65).

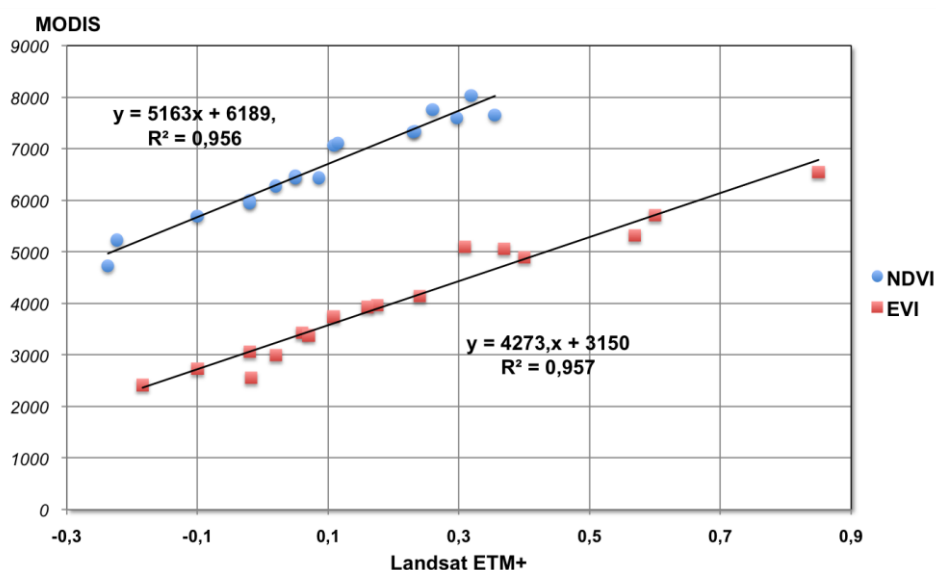


Figure 65 : Calibration des indices de végétation EVI et NDVI du capteur MODIS par le capteur ETM+, sur la zone d'étude.

Etant donnée la différence de résolution entre ces deux capteurs (250m pour MODIS, 29,5m pour Landsat), chaque valeur d'un pixel extrait de l'imagerie MODIS est comparée avec la valeur médiane d'une matrice de 8x8 pixel sur l'image Landsat. Les valeurs d'indice EVI sont beaucoup plus étalées que celles de l'indice NDVI, quel que soit l'état de la couverture végétale. Un facteur de 10000 a été appliqué aux indices MODIS pour disposer d'un intervalle de valeurs cohérent. Les valeurs inférieures à 0 sur Landsat ETM+ correspondent à des surfaces d'eau libre ou de sols nus.

La très bonne corrélation de ces deux indices sur l'image de référence permet d'appliquer les fonctions de régressions respectives aux valeurs extraites du capteur MODIS.

4.1.2.3.2. Suivi phénologique de la plaine du Logone par le capteur MODIS

L'étroitesse de la bande 3 (canal rouge) du capteur MODIS provoque une saturation des zones luxuriantes pour l'indice NDVI. Cet effet est atténué avec l'indice EVI par l'intégration du canal bleu dans le rapport. En revanche, la discrimination des espèces végétales des zones moins denses est plus efficace avec le NDVI. Le suivi de ces deux indices est donc mené en parallèle. En 2008, les valeurs d'indice EVI annoncent le début du développement des végétaux vers la fin juin (jour 180). Le NDVI se décale d'un mois par rapport à l'indice précédent, et prolonge cette activité jusque vers fin octobre. Les deux indices s'accordent sur la pauvreté de la couverture végétale entre janvier et avril.

La phénologie de la végétation de la plaine de déversement du Logone est étudiée pour quatre biomes distincts : les zones agricoles, les marécages permanents du bord du Logone, la plaine inondable, herbacée et arborescente, et les étangs. Ils sont représentés sur les diagrammes par leurs évolutions type, dans la plaine du Logone (Figure 66 et Figure 67). Ces biomes sont localisés sur la Figure 69.

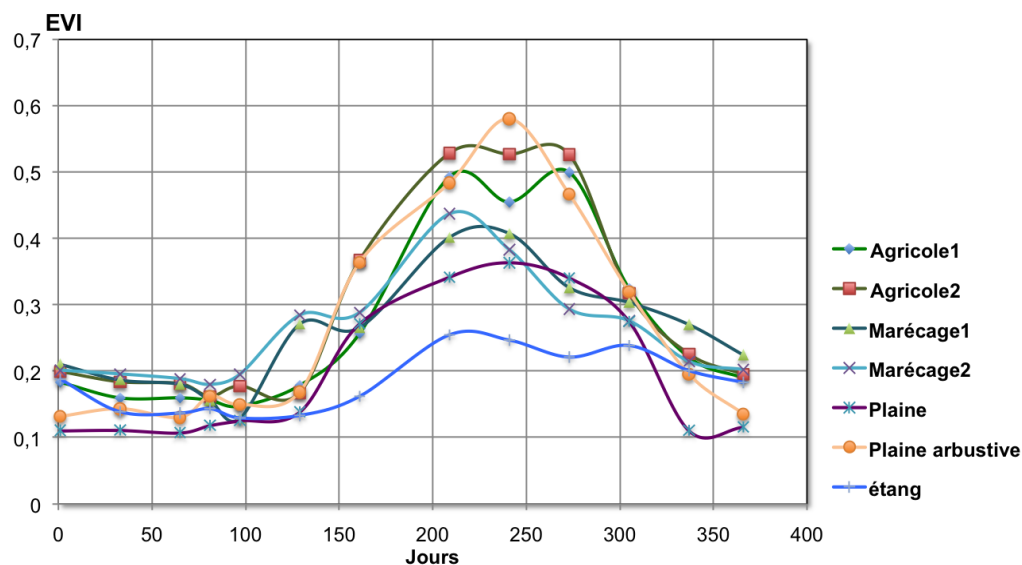


Figure 66 : Evolution de l'indice EVI sur l'année 2008, par type de couvert végétal
Les valeurs d'indice ne dépassent pas 0,2 durant les mois d'été, quel que soit le type de couvert. Elles correspondent à un sol dégarni. Les prairies marécageuses (marécage1 et marécage2) se peuplent de manière précoce par rapport aux autres régions de la plaine et présentent l'écart saisonnier le moins important. La croissance de la savane (plaine et plaine arbustive) suit le régime des précipitations.

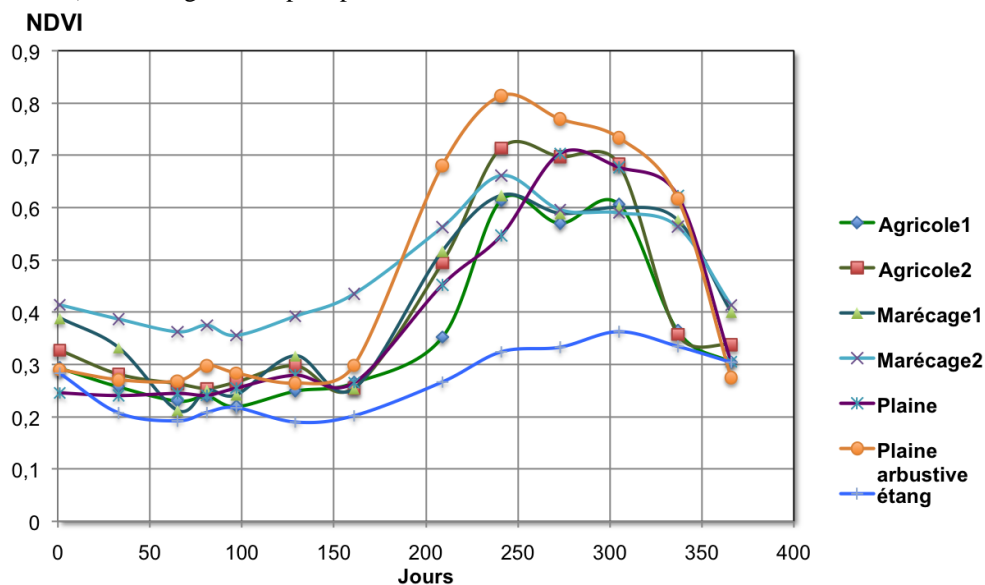


Figure 67 : Evolution de l'indice NDVI sur l'année 2008 par type de couvert végétal
La logique de croissance observée sur l'indice EVI pour la prairie marécageuse se retrouve avec l'indice NDVI. Le rythme de développement de la végétation montre cependant un décalage de 30 jours systématique entre les deux indices NDVI et EVI. Les artefacts atmosphériques créés par l'humidité de l'air aux mois de juin et octobre sont responsables de ce décalage.

Les **zones agricoles** (Figure 69) au sud-ouest de Bousso ($16,737^{\circ}\text{E}$, $10,36^{\circ}\text{N}$) alternent entre la culture du coton, en déclin, et de celle de l'arachide (Magrin, 2001). La difficulté à prévoir l'évolution annuelle de cette dernière provient de l'habitude alimentaire de sa consommation. Précoce, elle peut être récoltée après 90 jours de pousse, soit au mois d'août (jours 210 à 240). Tardive, elle se récolte après 140 jours, soit fin septembre (jour 270). Elle s'observe sur l'indice EVI par un infléchissement de l'activité chlorophyllienne au jour 240. L'indice NDVI montre également cet infléchissement, mais avec un décalage de 30 jours.

La **zone agricole** au nord de Laï (17,08°E, 10,412°N), particulièrement enclavée, était, en 1980-1990, la première région rizicole tchadienne. Elle s'est accompagnée d'aménagements importants de la plaine par un découpage des zones inondables en casiers de plusieurs milliers d'hectares (Magrin, 2001). Ces aménagements sont bien visibles sur l'image par leur forme géométrique. Depuis les années 2000, la diversification des cultures alterne riz avec diverses céréales, mil et surtout taro (Jamin *et al.*, 2003) (Figure 68). Les pratiques agricoles de ce dernier se rapprochent de celles du riz et empruntent les aires irriguées occupées autrefois par la riziculture (Reounodji, 2002). La récolte du taro a lieu avant le retrait des eaux, fin octobre (Seignobos, 1988). Elle explique le maintien des fortes valeurs d'indices sur toute la période estivale et la brusque chute des valeurs entre les jours 260 et 300.



Figure 68 : Plantations de l'espèce taro *Xanthosoma sagittifolium* cultivée dans la plaine du Logone

Les zones de culture de taro sont très reconnaissables sur imagerie optique THR (ici Quickbird) par une tâche circulaire claire autour du plant, le tubercule étant dégagé pour la pousse. Ces tâches ne doivent pas être confondues avec les points blancs qui apparaissent dans la même zone sur imagerie Landsat. Celles-ci sont le résultat d'un assèchement différentiel du sol sur la zone d'influence des racines d'arbres. La croissance du taro est très rapide et fournit un feuillage très dense. Cette plante dépasse 1m de haut.

Les **prairies marécageuses** des rives d'un affluent du Logone (15,511°E, 9,688°N et 15,534°E, 9,646°N) sont couvertes toute l'année par une végétation herbacée à Andropogonées. Le brûlis de ces herbacées aux mois de janvier et février explique les faibles valeurs des indices NDVI et EVI pour cette période. Le centre du marécage (courbe marécage2), qui reste humide toute l'année, conserve une végétation résiduelle qui lui confère les valeurs d'indice de végétation les plus élevées de la plaine d'inondation de décembre à juin. La crue du fleuve au mois de juillet marque l'accroissement de l'activité de ce type de végétation. Le maintien de conditions hydriques favorables au développement de ces plantes se prolonge jusque vers fin novembre. Les Andropogonées constituent des barrières végétales hautes de 1 à 2 m parfaitement infranchissables pour les véhicules roulants.

La **plaine inondable** (16,65°E, 10,011°N) est occupée par une savane herbacée où domine l'espèce *Piliostigma*. Les arbres et arbustes (*Gardenia*) sont peu nombreux et isolés (Pias, 1970). La savane recouvre les sols hydromorphes à gley. La faible densité végétale de ces zones croît avec l'arrivée des inondations. Les valeurs du NDVI sont inférieures à celles de l'EVI aux mois d'été. En saison sèche, le brûlis efface pratiquement toute trace de végétation et les valeurs d'indice sont très faibles.

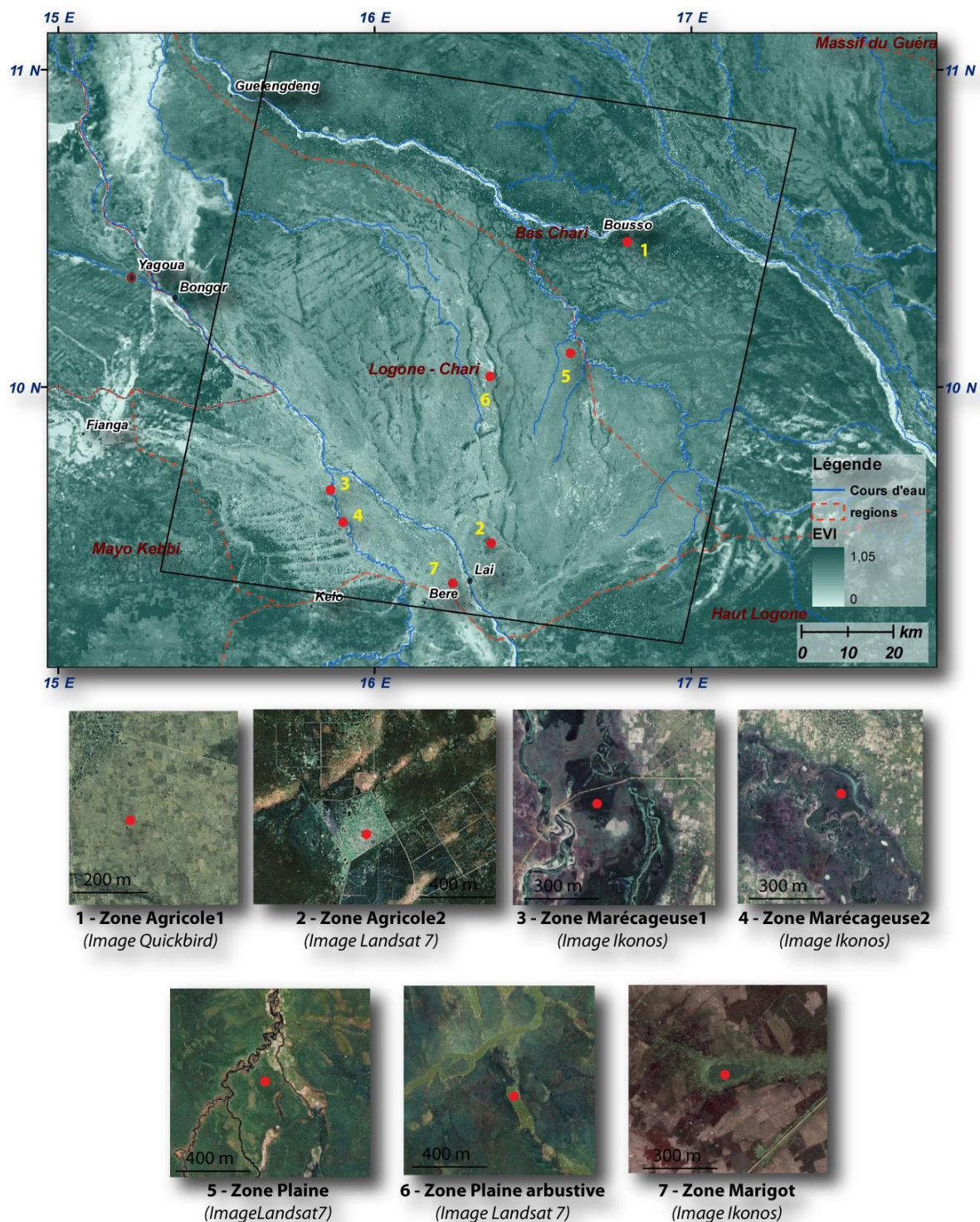


Figure 69 : Localisation des points de mesures des indices de végétation, sélectionnés pour les différents biomes de la plaine du Logone

Les valeurs de l'indice EVI des capteurs Landsat et MODIS sont très comparables. Les zones agricoles ont volontairement été sélectionnées dans les zones spécifiques de Bousso et de Lai pour leur homogénéité. La zone marécageuse1 se distingue de la zone marécageuse 2 par sa localisation au cœur de la plaine alluviale, inondée en période de crue. La plaine arbustive est, avec la zone agricole 1, la seule à ne jamais être inondée.

La **plaine arborée et arbustive** (16,48°E, 10,15°N) est parcemée d'acacias (*Faidherbia albida* et *acacia senegal*) très espacés les uns des autres. L'espèce *Faidherbia* est un arbre de très grande taille qui fournit un ombrage important pendant la saison sèche et perd ses feuilles pendant la saison humide. Les zones de savane à *Faidherbia* présentent donc des valeurs d'indice plus élevées que la savane exclusivement herbacée en saison sèche. La plaine arborée couvre des plate-formes de quelques centimètres de hauteur. L'eau s'accumule autour des zones dépressionnaires en d'innombrables petites mares (Pias, 1970). Les acacias occupent également les buttes exondées de sols hydromorphes à pseudogley. Celles-ci sont surélevées de 6 à 8 m par rapport à la plaine herbacée. Leurs bordures ont très souvent fait l'objet d'un réaménagement par l'homme.

Les **marigots** (16,23°E, 9,374°N) sont recouverts en saison humide par des colonies de nénuphars. En été, ces étangs se réduisent à des flaques des quelques mètres carrés. Ces plantes aquatiques ne produisent pas une photosynthèse intense, et les valeurs d'indice des indices EVI et NDVI pour une surface d'eau libre sont très faibles. Ces valeurs restent faibles sur toute l'année et, comparativement, les plus basses de tous les biomes pour la saison humide.



Figure 70 : Exemple de marigot recouvert en partie par des nénuphars, Nord N'Djaména
 Cette photo a été prise le 10 octobre 2008. L'impossibilité de réaliser des travaux de terrain à Laï a amené à observer le même phénomène dans et autour de Ndjamen. L'image Quickbird date de janvier 2008.

4.1.2.3.3. Conséquences sur l'estimation de la biomasse et de la densité racinaire

Le recouvrement important des valeurs d'indices des différents types de surfaces lors des phases de croissance et de dégénérescence ne permet pas une bonne différenciation efficace des biomes de la plaine du Logone. En revanche, nous pouvons dégager quelques tendances intéressantes pour notre problématique :

- de décembre à juin, une seule espèce végétale recouvre la plaine : l'arbre *Faidherbia albida*. La densité de la biomasse végétale est nulle à cette exception près. Elle n'intervient donc pas dans la modélisation de la traficabilité ;
- de juillet à septembre (inclus), une végétation dense recouvre la plaine. Le seuillage de l'indice EVI à 0,5 délimite les biomes trop densément peuplés. Ils sont considérés alors comme des obstacles. En deçà, on corrèle la densité de la biomasse, estimée par l'indice EVI, et la biomasse racinaire. La densité de racine est déduite de la biomasse racinaire sur la couche critique (0-40 cm) ;

- juin et novembre sont des mois de transition. La relation entre indice et densité de racines est appliquée.

L'activité photosynthétique qui accompagne l'accroissement de la densité de biomasse végétale se manifeste par une hausse de la réflectance dans le domaine du proche infrarouge (Jordan, 1969; Rouse *et al.*, 1973). Les indices de végétation NDVI et EVI, basés sur cette observation, se corrèlent, selon une régression linéaire, avec cette densité. Ces estimations, mesurées à différents stades phénologiques de friches herbacées (Reeves, 2006), zones agricoles et prairies ouvertes (Scott Flynn *et al.*, 2008), montrent une augmentation des pentes des droites de corrélation au fur et à mesure de la croissance de ces zones. Ces coefficients ne dépendent pas des espèces végétales (Brown, 1997). La relation entre biomasse et indices de végétation n'a été validée que pour des surfaces herbeuses. L'extension de cette relation aux biomes tropicaux continue de faire l'objet de nombreuses recherches (Gitelson, 2004; Tucker C., 2006; Baccini *et al.*, 2008).

Nous avons adapté la relation linéaire entre la densité de biomasse et les indices de végétation NDVI et EVI, mise en évidence par Reeves (2006) et Scott Flynn *et al.* (2008), à la phénologie des prairies et savanes de la zone d'étude. La relation entre ces deux paramètres s'écrit sous la forme $y = a x + b$. Les coefficients a et b sont calculés séparément pour les deux indices, en raison de l'écart entre leur valeurs (Tableau 6). La frondaison inverse de l'espèce *faidherbia*, présente dans les zones de plaine arbustive, n'est pas prise en compte dans ces calculs.

La biomasse racinaire des surfaces de savanes herbeuses est estimée à 32% de la biomasse totale (Niklas, 2005). Les racines des prairies marécageuses et savanes tropicales sont maximales dans la tranche 0-40 cm, qui concentre 70% de la biomasse totale (Jackson *et al.*, 1996) et 98% de la densité totale racinaire. Les racines d'herbes de la savane suivent la même dynamique que les racines d'arbustes (Mordelet, 1993). L'évolution annuelle de la densité racinaire moyenne des surfaces herbeuses sur la tranche 0-40 cm est estimée à partir des valeurs de biomasse totale (Figure 71).

Période depuis le 1 ^{er} janvier	Coefficients relatifs à l'indice NDVI		Coefficients relatifs à l'indice EVI	
	A	b	a	b
0-120j	1035	-125	2424	-235
121-170j	1035	-125	4000	-610
171-220j	6077	-1015	8042	-1052
221-320j	14035	-4026	17275	-1410
321-350j	14035	-4026	8042	-1052
>350j	1035	-125	2424	-235

Tableau 6 : Coefficients des droites de corrélation entre densité de biomasse végétale et indices de végétation NDVI et EVI, pour les surfaces herbeuses de la plaine du Logone.

Le décalage d'évolution des indices NDVI et EVI mesurés sur l'année 2008 n'est pas résolu par ces estimations. Les valeurs de biomasse estimées sont très proches entre les différents biomes herbeux de la plaine, hors zone agricole. Les valeurs de biomasse sont cohérentes avec les résultats de Reeves (2006) et Scott Flynn *et al.*, (2008).

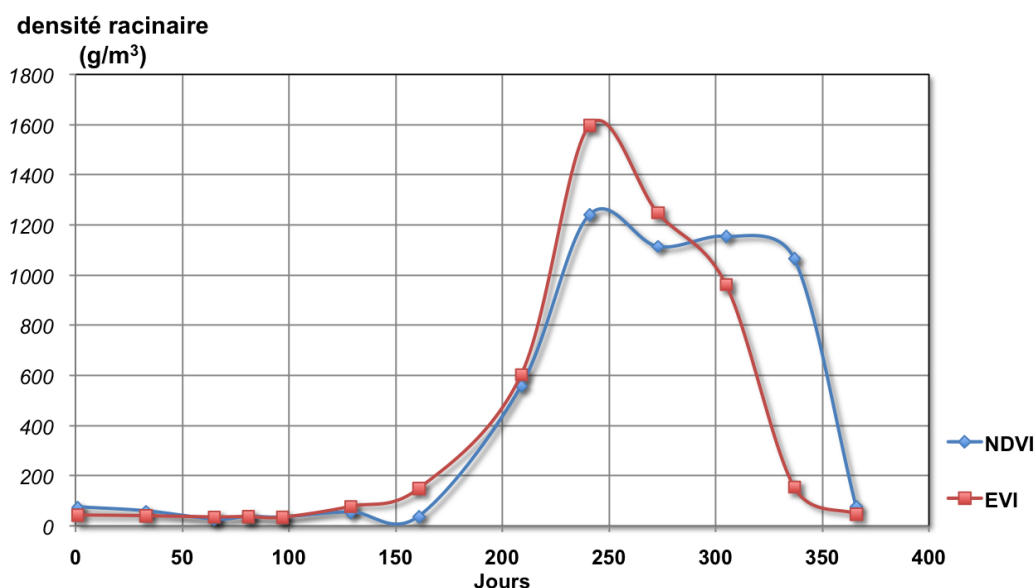


Figure 71 : Evolution annuelle de la densité racinaire des zones herbeuses de la plaine du Logone, pour les indices NDVI et EVI

Les valeurs de densité racinaire sont très comparables quel que soit l'indice employé. Les écarts entre les jours 220 et 300 sont à attribuer à la présence de nuages qui altère les enregistrements. Les valeurs de 1600g/m^3 de racine ne distinguent pas les racines mortes des vivantes, dont le rapport peut atteindre 1,2. Une densité racinaire inférieure à 200g/m^3 n'affecte ni l'humidité ni la cohésion des sols.

Il ne nous a pas été possible de vérifier par des mesures de terrain la qualité de ce procédé d'extraction de la densité racinaire à partir des valeurs des indices NDVI et EVI. Cependant, pour les régions de savanes herbacées et prairies, ce résultat est cohérent par rapport aux résultats d'études de terrain menés sur des biomes comparables (Fiala *et al.*, 1988; Sundarapandian *et al.*, 1996). Il n'est pas reproductible aux surfaces boisées et agricoles, dont les paramètres régissant ces calculs (corrélation NDVI/biomasse, rapport biomasse totale/biomasse racinaire et structure racinaire) sont encore mal connus.

4.1.2.4. Les zones arborescentes

Les régions arborescentes de la plaine du Logone sont peu nombreuses, en raison d'un héritage agricole important et de grands territoires inondés. Il est cependant acquis qu'une densité d'arbre supérieure à 30% est suffisante pour bloquer le passage d'un véhicule et entraîner une déviation (Shoop, 1993; Kokkila, 2001; Eichrodt, 2003; Fleming *et al.*, 2008).

Le produit MODIS TERRA Vegetation Continuous Field fournit une couverture de la totalité du Tchad méridional à 500 m de résolution. Ce produit annuel est dérivé de séries temporelles des sept bandes de réflectance du capteur. Il exprime chaque pixel de la surface par un pourcentage de couverture en arbres, herbes et sol nu.

L'évolution de cette couverture entre 2001 et 2005 montre une diminution sensible de la densité d'arbres dans la plaine. Les écarts les plus significatifs sont marqués au nord de Bousso par un déboisement important. Les pratiques agricoles se sont étendues dans cette région avec la diminution des inondations saisonnières. Le même phénomène est observé dans la zone de déversement du Logone. Les régions plus boisées à l'est de la plaine n'ont pas évoluées.

La densité d'arbres et d'arbustes en 2005, dans la plaine entre les rives du Logone et du Ba Illi, n'est pas suffisante pour constituer un obstacle permanent. En revanche, à l'est de la plaine, la surface de la canopée atteint 45%, pour une moyenne de 35%. Cette région est restée stable sur l'intervalle 2001-2005. Elle demeure une zone à contourner.

4.1.2.5. Synthèse des résultats sur la plaine du Logone

La caractérisation de la végétation conduite sur la plaine du Logone, répond à nos objectifs par un suivi phénologique des espèces végétales mis en corrélation avec deux indices spectraux. Elle se synthétise en trois points :

- une estimation dynamique de la densité racinaire pour les zones herbacées, à partir des valeurs de l'indice EVI. Extrait du capteur MODIS, cet indice peut être récupéré tous les 16 jours, à une résolution spatiale de 250 m. La densité de racines, contenues dans la couche 0-40 cm du sol, est calculée pour cet intervalle temporel ;
- une estimation dynamique de la surface occupée par les obstacles végétaux, à partir du seuillage de l'indice EVI à 5000. Cette valeur correspond à une densité de végétation suffisante pour constituer un obstacle au franchissement, quel que soit la nature de l'espèce végétale ;
- une estimation de la densité d'arbres et arbustes. Supérieure à 30%, elle constitue un obstacle infranchissable.

La figure 24 illustre ces résultats, pour trois dates de l'année. Elles sont représentatives de trois périodes d'évolutions saisonnières du paysage : fin de saison sèche (6 avril), pleine saison humide (28 août) et fin de saison humide (25 octobre).

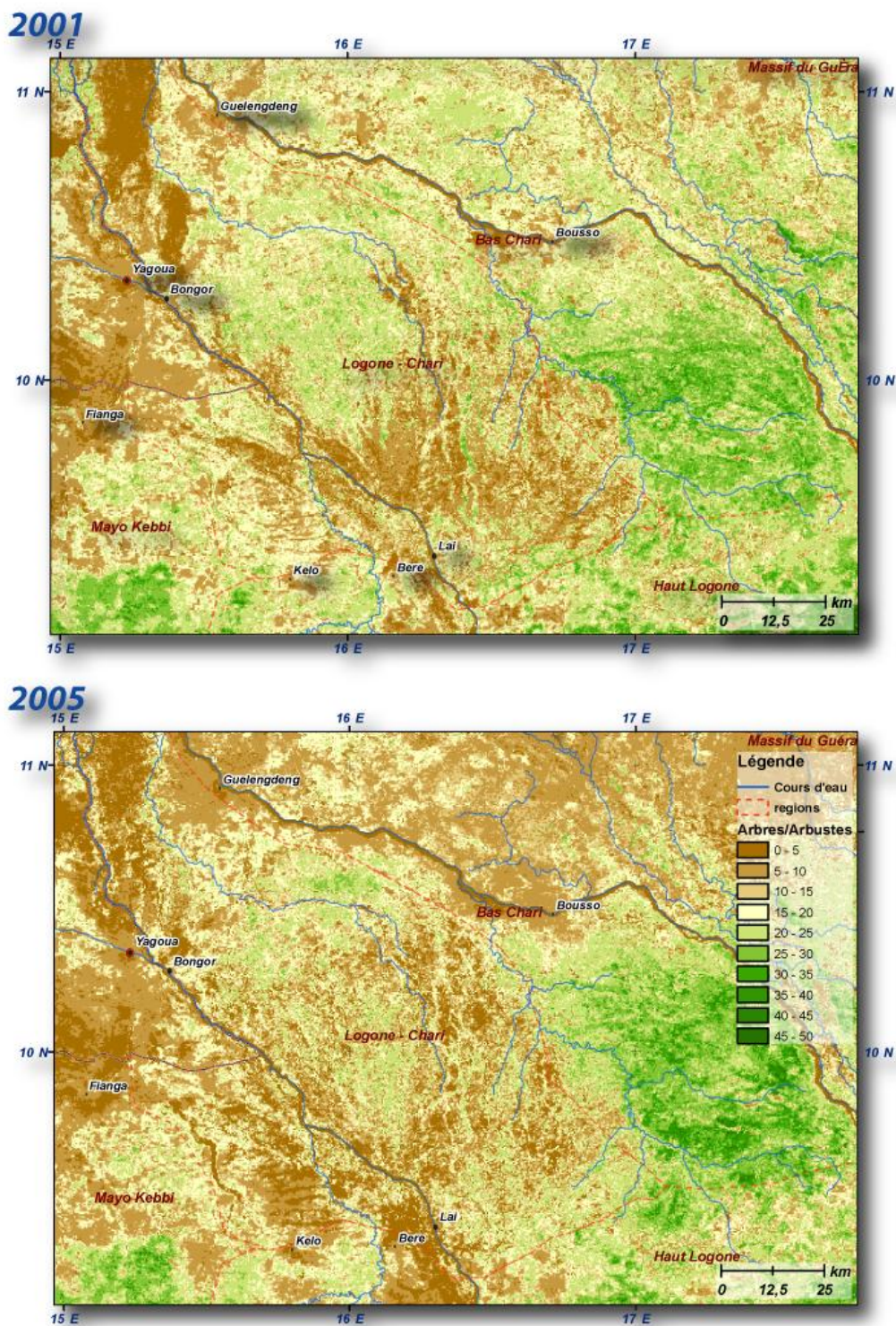


Figure 72 : Evolution de la surface boisée entre 2001 et 2005. Produits du capteur MODIS Vegetation Continuous Fields (MOD44B).

La densité boisée maximale de la zone de 45% est très localisée. Les buttes exondées de la plaine apparaissent sensiblement plus boisées que les fonds de prairies et savanes par des aménagements agricoles.

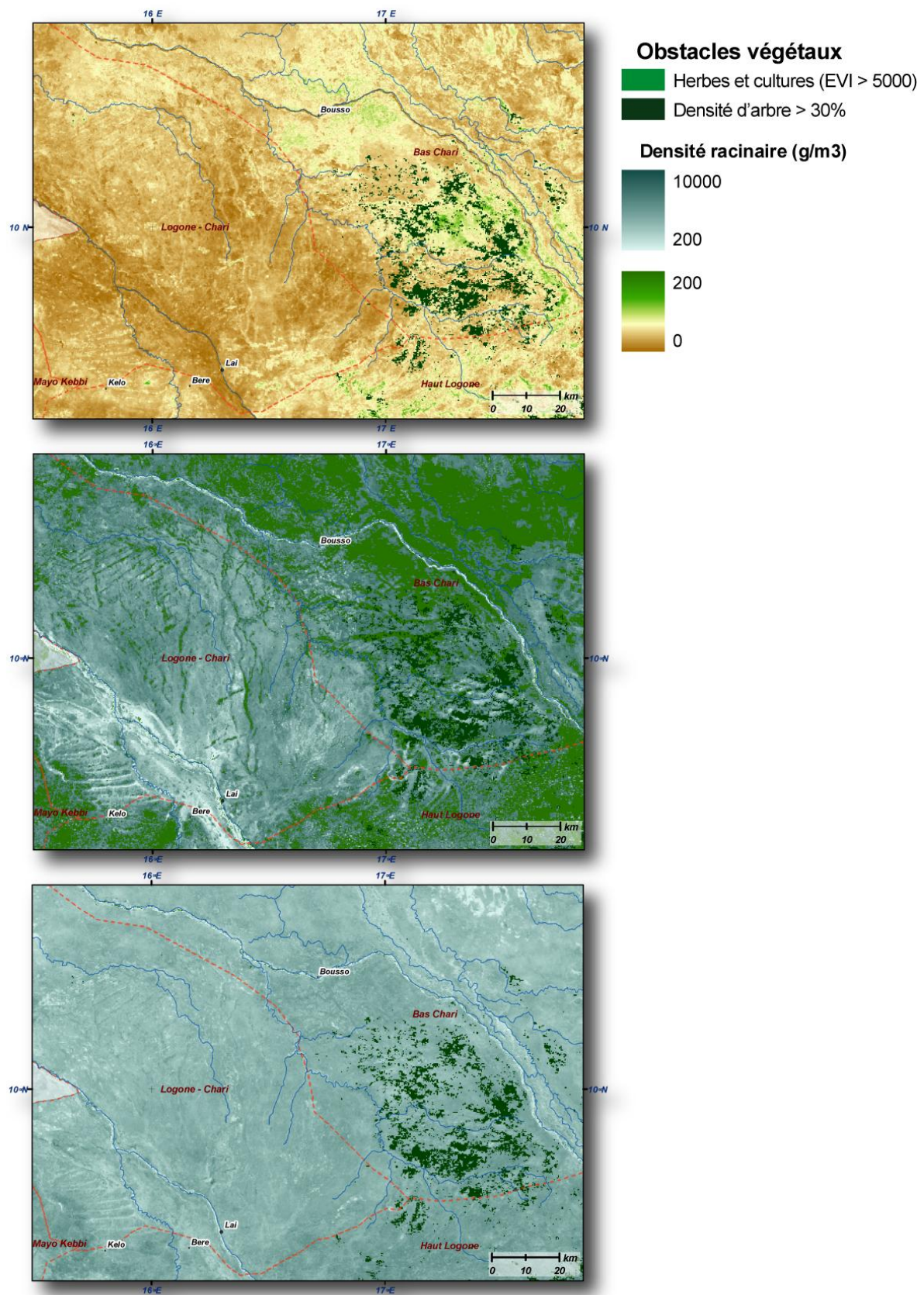


Figure 73 : Caractérisation de la végétation pour la traficabilité (obstacles et densité racinaire) aux dates du 6 avril 2008 (haut), 28 août 2008 (centre) et 31 octobre 2008 (bas)

4.1.2.6. Portée de l'analyse

Par une fauchée de 3500 km, les produits de végétation du capteur MODIS couvrent la totalité de la surface du Tchad méridional en deux images seulement. La portée de l'estimation de la densité racinaire a ainsi été évaluée sur l'image qui s'étend sur le Ouaddaï et l'est du Salamat.

Au nord de Goz Beida (12^e parallèle), la végétation ne subsiste que sur les berges des oueds inondés, sous forme de broussailles et de plants épars de graminées. La mousson africaine n'occupe qu'une période de deux mois, pendant laquelle la végétation se développe dans les zones humides (Figure 74). Le reste de l'année, les sols sont nus. Les grands arbres à feuillage dense, de type *Faidherbia*, résistent à la sécheresse. Les concentrations de population de l'Ouaddaï (Abéché, Adré, Am Timan, Goz Beïda côté tchadien et Al-Junaynah côté Soudan) sont auréolées de champs de céréales (sorgho, mil) et de coton.



*Figure 74 : Développement de la végétation sur une des pistes orientales d'Adré, au 18 juillet 2008
(source Flickr, photo © Mia Farrow)*

La ville d'Adré est située à la frontière soudano-tchadienne. La piste est très empruntée. Ce sont les camions de ravitaillement, rejoignant les camps de réfugiés qui génèrent ce type d'ornières.

Dans la région du Salamat, au sud du 12^e parallèle, les espèces végétales sont assez proches de celles de la plaine du Logone. Une savane ouverte à graminées occupe les plateaux tandis que les marécages à *Andropogonées* et *nénuphars* se concentrent dans les petites dépressions, autour du lac Iro, ou dans le parc naturel de Zakouma (Figure 75). La dépression du Salamat est peuplée principalement par des groupes ethniques semi-nomades, ce qui explique l'absence quasi totale de zones de cultures (Magrin, 2001).



Figure 75 : Zone marécageuse du parc de Zakouma, Salamat, datée du 26 octobre 2008 (source FlickrR, photo de Jeff Hudgens pour CNN international)

La densité arborée de cette partie du Tchad est trop faible pour constituer des obstacles d'une envergure équivalente à la résolution du capteur MODIS. La phénologie de ces paysages ouverts suit le régime des précipitations. La période pendant laquelle la végétation est bien développée est donc plus longue dans la région du Salamat que dans l'Ouaddaï (Figure 76). Seules les zones marécageuses autour des oueds de l'Ouaddaï et du Salamat constituent un obstacle au franchissement.

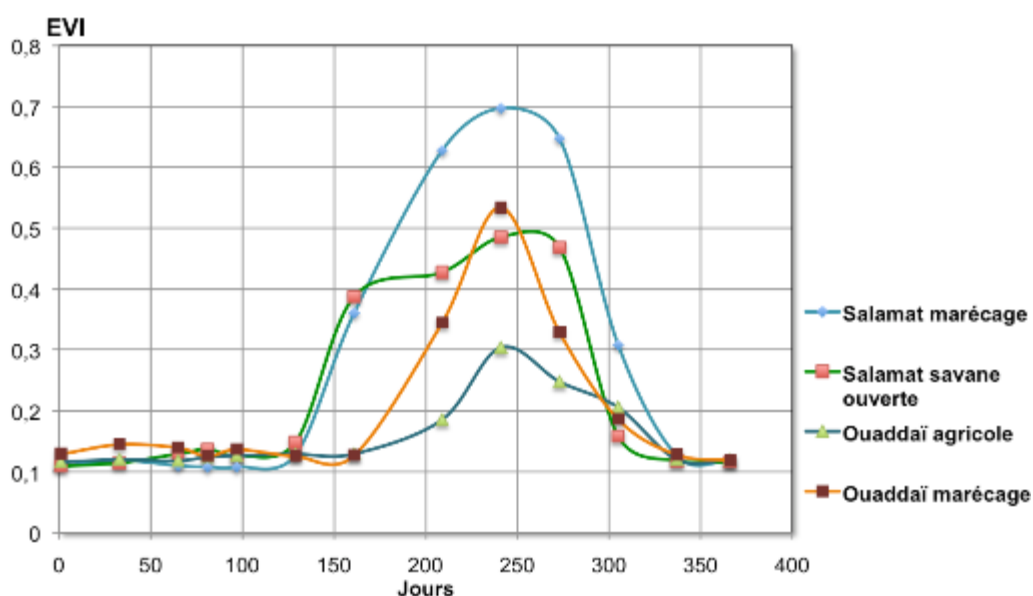


Figure 76 : Valeurs d'indices EVI pour quatre paysages des régions de l'Ouaddaï et du Salamat

La croissance des végétaux des marécages du Salamat démarre plus tôt et se prolonge plus longtemps que celle de leurs homologues du Logone, pourtant situés à la même latitude. Elle se corrèle avec une période de mousson plus longue dans cette région que dans l'ouest du Tchad méridional (cf. chapitre 4 sur la ville de Djouna). Les valeurs extrêmes sont également plus élevées, car ces surfaces marécageuses s'étendent dans de larges vallées peu profondes.

Bien qu'il existe un décalage phénologique des espèces végétales de la région, nous avons préféré conserver les coefficients de conversion entre indice EVI et biomasse végétale sur les mêmes intervalles de temps établis pour la plaine du Logone. En effet, la continuité et l'homogénéité spatiale des valeurs d'interprétation prévalent sur l'écart faible de valeurs induit par l'emploi de deux coefficients de droite. Les mêmes types de paysages étant rencontrés, les coefficients de transformation entre biomasse et densité racinaire sont également conservés.

La cartographie de la végétation en période de fin de saison sèche (6 avril 2008) et en pleine saison des pluies (28 août) est similaire à celle de la région du Logone (Figure 77). Elle valide ainsi la portée de la restitution spatiale de la biomasse à l'ensemble du Tchad méridional.

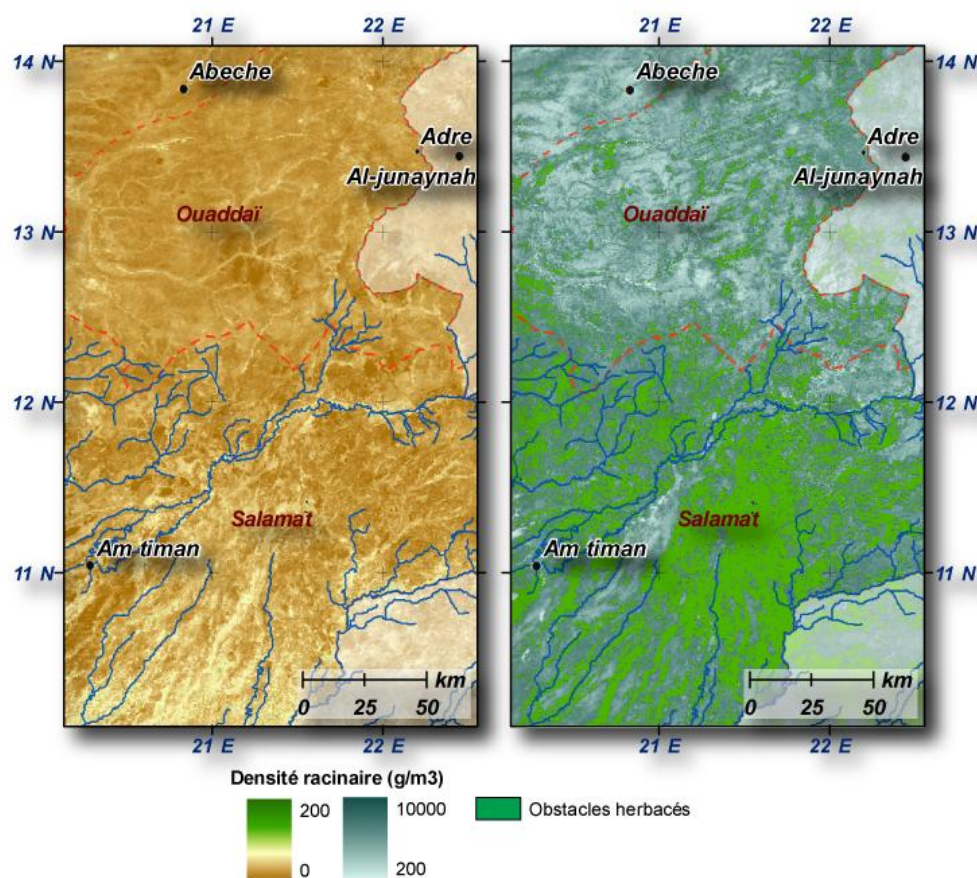


Figure 77 : Caractérisation de la végétation pour la traficabilité (obstacles et densité racinaire) aux dates du 6 avril 2008 (gauche) et du 28 août 2008 (droite)

Au mois d'avril, la densité de racine est quasiment nulle, sur tout le secteur amont du Salamat et de l'Ouaddaï. Fin août, tous les talwegs importants sont occupés par une végétation marécageuse dense. A cette période, la végétation herbacée s'étend jusqu'à Abéché, mais elle se raréfie au nord du bassin versant du Chari.

4.1.3. Surfaces bâties

La prise de conscience de l'impact humain sur la problématique du réchauffement climatique a mis en évidence la méconnaissance d'une estimation quantitative de la croissance de la superficie urbaine et l'intérêt du développement de méthodes adaptées de suivi de cette croissance. Les méthodes développées à partir de capteurs satellitaires s'inscrivent dans ce contexte, à l'exemple des travaux menés au titre du programme GMES (Seto, 2009).

A l'échelle régionale, la plupart de ces méthodes s'appuient sur des systèmes de classification supervisée classique, à partir de données MODIS. Cependant, elles se distinguent les unes des autres dans le paramètre discriminant (lumière, surface imperméable, écorégionalisation de l'environnement urbain), tout en gardant une portée globale (Elvidge *et al.*, 2009 ; Schneider *et al.*, 2009) liée à la résolution du capteur. Ces approches requièrent donc une grande quantité de données, et ne sont pas adaptées à la détection des petites agglomérations rurales (moins de 25 ha).

4.1.3.1. Démarche

La zone test utilisée pour les critères sols et végétation n'est pas optimale pour l'extraction des surfaces bâties du fait de la faible surface urbanisée. L'extraction des surfaces bâties est en conséquence testée sur les villes de Kousseri et N'Djamena, à la frontière Tchad-Cameroun (15°3'E – 12°6'N). La méthode présentant les résultats les plus satisfaisants est ensuite reportée sur la plaine du Logone pour apprécier son efficacité sur les petites villes et villages.

La capitale tchadienne couvre une superficie d'environ 22 km². Son centre ville est suffisamment dense pour posséder une signature spectrale qui se rapproche de la signature spécifique des toits de tôle. A cette résolution, les toits en paille des villages ruraux ne sont pas décelables par caractérisation spectrale.

Nous avons réalisé l'extraction des surfaces bâties sur deux images Landsat de la zone de N'Djaména-Kousseri, acquises les 21 octobre 2001 et 12 Janvier 2003. Elles s'inscrivent chacune dans des périodes complémentaires : la première prise de vue correspond à un contexte de fin de saison des pluies, la seconde au milieu de saison sèche. L'évolution du paysage redistribue les valeurs de contraste des zones bâties par rapport à leur environnement. La plupart des techniques d'extraction des zones urbaines font appel aux variations de texture de l'image (Lorette *et al.*, 1998).

Notre choix est donc d'approcher l'extraction des zones urbaines avec l'imagerie Landsat. Nous avons testé et comparé deux méthodes classiques de classification supervisée : maximum de vraisemblance et orientée objet. La première maximise les valeurs de contraste, tandis que la seconde maximise les effets de texture. Afin d'améliorer l'individualisation spectrale des zones urbaines de leur environnement, nous avons combiné les six bandes spectrales optiques du capteur avec une somme d'indices et de valeurs complémentaires, appuyées sur une analyse en composantes principales (ACP) :

- les quatre premières composantes de l'ACP des images résument 98,5% des informations spectrales de la méta-image ;
- un filtre laplacien appliqué à la 5^e composante de l'ACP renforce les effets de structure en accentuant les structures linéaires (Latry, 2005) : routes goudronnées, bordures de rivières, terrasses alluviales (Figure 78) ;
- l'indice de brillance (IB) donne de bons résultats dans la discrimination des sols nus en zone aride (Ouerchefani *et al.*, 2008). Sur l'image de 2003, il décorrèle les forts réflecteurs des zones de bâtis et des sols sableux nus. Son influence est plus faible sur la prise de vue de 2001 qui est moins saturée. L'indice de brillance s'écrit sous la forme :

$$IB = \sqrt{R^2 + NIR^2}$$

avec :

R, spectre rouge (bande 3 sur le capteur ETM+)

NIR, proche infrarouge (bande 4 sur le capteur ETM+)

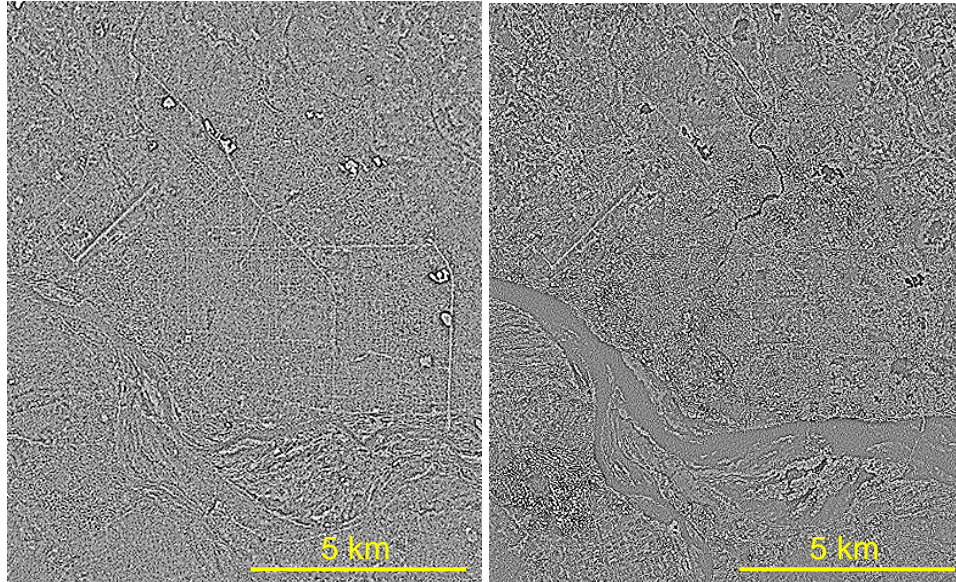


Figure 78 : Filtre laplacien de la 5^e composante de l'ACP de l'image Landsat de 2003 (à gauche) et de 2001 (à droite)

Sur l'image de 2003, le filtre met en évidence les surfaces goudronnées (routes et aéroport) qui apparaissent brillantes. Les rues intra-urbaines forment ainsi un quadrillage régulier. Le contraste entre ces surfaces sombres et leur environnement fortement réflecteur (sols nus sableux) provient du spectre optique. Le même filtre appliqué sur l'image de 2001 ne permet pas de distinguer les linéaments. En revanche, les zones les plus végétalisées de la ville apparaissent plus sombres que l'environnement.

- l'indice des surfaces urbanisées (ISU). Cet indice a été initialement développé pour le capteur Spot5 (Abdellaoui *et al.*, 1994). La réflectance des zones urbaines, qui prend en compte l'hétérogénéité de l'habitat urbain (densité, matériau de construction, stade de réalisation), admet un léger maximum vers 650 nm (Abdellaoui *et al.*, 1997). Le ratio rouge/infrarouge proche distingue les zones bâties (fort signal) des sols secs (signal plus faible). Les sols humides des rives du Chari sont toutefois confondus avec les zones urbaines. Nous l'avons adapté au capteur Landsat ETM+. Il s'écrit :

$$ISU = A - B \cdot \left(\frac{R}{IR} \right) \text{ avec } A = 100 \text{ et } B = 25$$

- l'indice EVI, déjà employé pour la caractérisation de la végétation de la plaine du Logone à partir du capteur MODIS (cf. ch4, 1.2), permet d'individualiser les aires végétalisées intra-urbaines (parcs, rives du Chari) des zones marécageuses de la banlieue de N'Djamena. La précision des indices SAVI, MSAVI et TSAVI, qui s'ajustent aux sols nus, est identique. Les indices GEMI, NDVI, ARVI et PVI sont moins performants pour caractériser l'environnement urbain dans lequel la végétation est éparse (Bannari *et al.*, 1997).

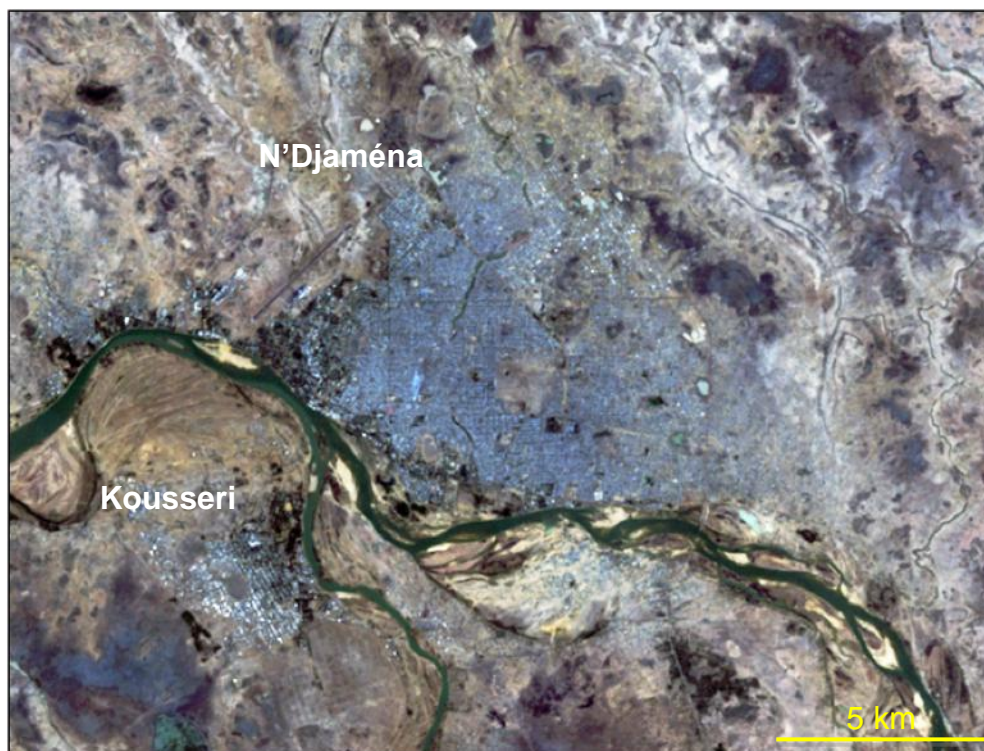


Figure 79 : Compositions colorées des canaux 321 extraits des images Landsat du 21 octobre 2001 (en haut) et 12 Janvier 2003 (en bas), centrées sur N'Djaména.

Sur l'image acquise en janvier, la plus avancée dans la saison sèche, figure un certain nombre de modifications du paysage : Chari réduit à son lit mineur, disparition quasi totale de la végétation, cultures brûlées, surbrillance des sols clairs.

4.1.3.2. Composition des ensembles de données

Les classifications ont été menées sur un ensemble de données composé des six canaux du capteur Landsat ETM+ originel, auxquels ont été rajoutés les indices et composantes d'ACP présentés précédemment. Les compositions des sets sont présentées dans le tableau suivant. Chacun des sets a été testé sur les prises de vues de 2001 et de 2003 (Tableau 7). Ces tests ont été conduits sur le logiciel ENVI.

Dénomination de l'ensemble	Composition de l'ensemble					
	8 Canaux Landsat	4 Composantes ACP	Filtre laplacien sur 5 ^e ACP	Indice de brillance	ISU	EVI
8 bandes	X					
4 résultantes ACP	X	X				
Laplacien B5	X	X	X			
Indice de Brillance	X	X	X	X		
ISU	X	X	X		X	
EVI	X	X	X			X

Tableau 7 : Composition des ensembles de données de classification

L'exercice de composition des ensembles tend à éviter la redondance des informations. C'est pourquoi aucun d'entre eux ne réunit les indices de brillance, de bâti et de végétation, basés tous les trois sur un rapport entre les bandes rouge et infrarouge proche.

La segmentation des images utilise un algorithme de détection de contours à gradient d'échelle (Witkin, 1983; Tabb *et al.*, 1997). Préféré pour sa rapidité de calcul, cet algorithme est toutefois limité à un calcul de trois canaux simultanés. Nous avons choisi les trois premières bandes du capteur Landsat. A chaque polygone sont attribués ses paramètres de forme et de texture, ainsi que les valeurs spectrales et ratio de l'ensemble complet. La classification supervisée par Machine à Vecteur de Support (Vapnik, 1995; Fradkin *et al.*, 2006) est conduite sur ces segments sur une base d'échantillonnage de l'image en six catégories. En appliquant ce même échantillonnage à la classification supervisée par algorithme de maximum de vraisemblance, nous pouvons comparer leurs résultats.

4.1.3.3. Résultats

Les villes de N'Djaména et Kousséri ont été interprétées à partir d'une image ASTER d'octobre 2002 qui constitue la référence de cette analyse. La qualité de la classification est estimée par le rapport de la superficie de la zone urbaine de référence sur la superficie de la classe ville issue des classifications Landsat (Figure 80, Figure 81). Les erreurs de commission créées au-delà de la zone urbaine (banlieue incluse) sont exclues du calcul. Elles peuvent cependant être appréciées par une qualification visuelle de l'image.

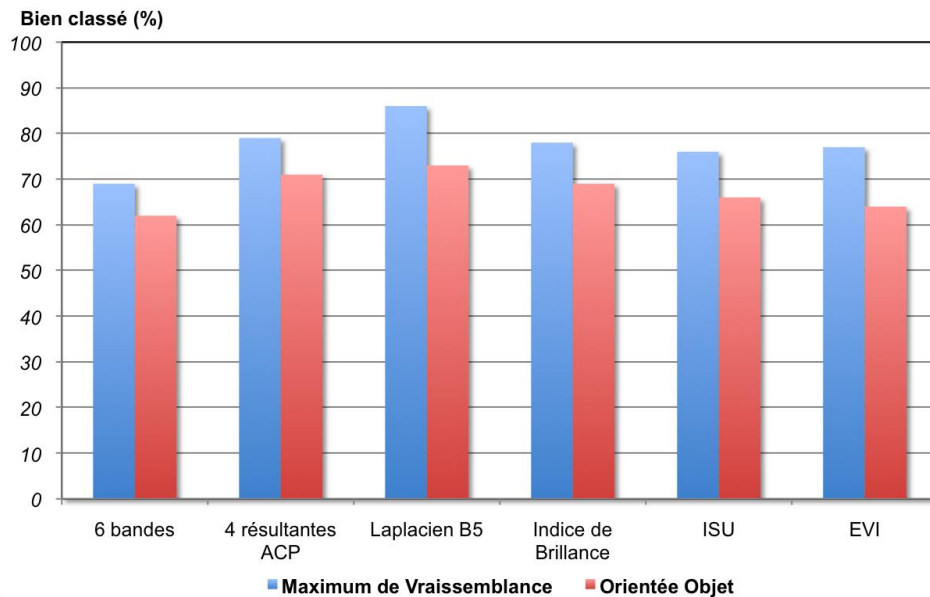


Figure 80 : Rapport des superficies de référence sur les superficies classées pour l'image Landsat d'octobre 2001

L'apport des trois indices, brillance, bâti et végétation, est quasi identique pour chacune des classifications. La meilleure composition (Laplacien B5) crée également le plus fort écart entre les deux types de classification.

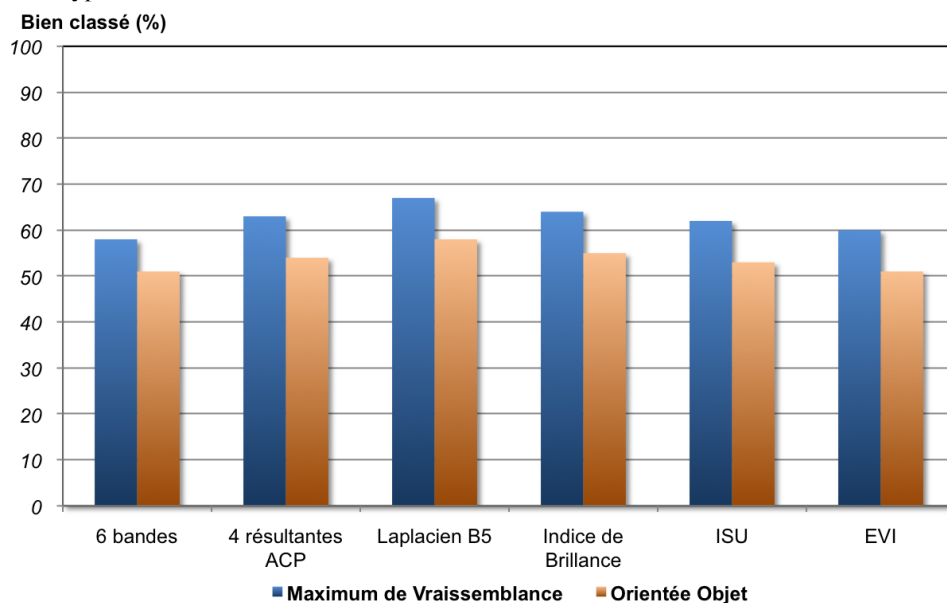


Figure 81 : Rapport des superficies de référence sur les superficies classées pour l'image Landsat de janvier 2003

La qualité des classifications sur l'image de janvier 2003 est inférieure d'environ 20% par rapport à l'image d'octobre 2001. Les écarts entre les deux méthodes sont compris entre 8 et 10%.

Sur les deux images, la composition optimale est obtenue en excluant les indices de brillance, de bâti et de végétation, et en retenant les six bandes spectrales optiques du capteur : les quatre premières résultantes de l'ACP et la cinquième résultante après un filtrage laplacien. Chacun des indices exclus crée une redondance avec l'information déjà présente dans les canaux spectraux originaux, voire ajoute un degré de confusion spectrale par un antagonisme avec les résultats des ACP.

Quatre niveaux de rejets ont été testés pour la classification par maximum de vraisemblance, à 95, 98, 99 et 100 %. Pour chacune des configurations envisagées, et quelle que soit l'image, la classification à base pixel, seuillée à 98%, donne de meilleurs résultats. La perte de contraste sur l'image de 2003 se répercute sur la qualité de la classification globale, là encore quelle que soit la composition des sets de données (Figure 82).

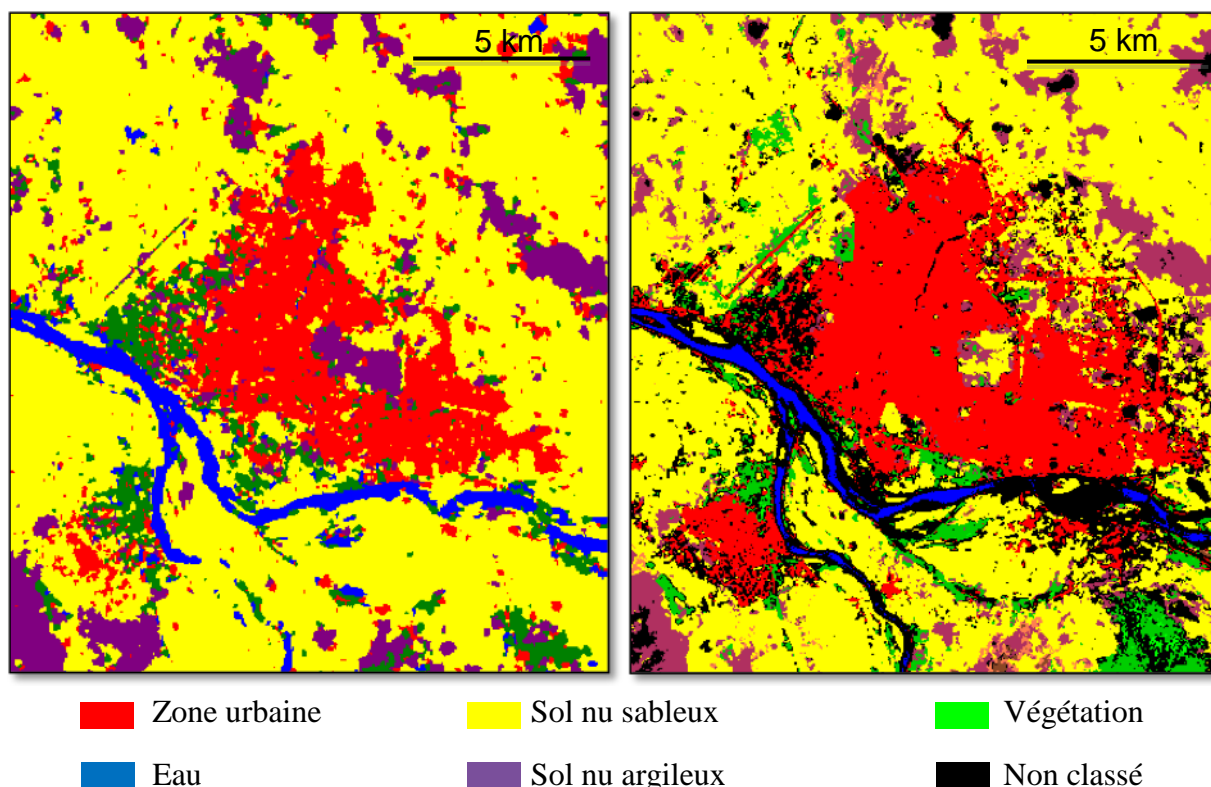


Figure 82 : Résultats des classifications orientées objet (à gauche) et maximum de vraisemblance (à droite), de l'image de janvier 2003, centrée sur N'Djaména

Les zones urbaines (en rouge) sont plus étendues sur la classification à base pixel, aussi bien sur N'Djaména que sur Kousséri. Sur l'image, la discrimination des surfaces bâties ne comprend que les zones les plus denses. Les aéroports et certaines routes sont confondus avec la ville par la classification pixellaire ce qui n'est pas le cas avec la classification orientée objet.

4.1.3.4. Conclusions et portée de l'analyse

4.1.3.4.1. Synthèse de l'interprétation sur N'Djaména

L'interprétation des images Landsat, acquises en octobre 2001 et en janvier 2003, a mis en évidence l'influence prédominante de la date de prise de vue sur la détection des zones urbaines. Les images acquises dans les périodes de transition climatique, octobre-novembre et mars-avril, sont les plus favorables, car l'étalement des valeurs spectrales diminue sensiblement le degré de confusion des surfaces.

L'extraction des surfaces bâties a donné de meilleurs résultats avec une classification à base pixel. Plus rapide, cette méthode est aussi moins exigeante dans le choix des échantillons par rapport à la classification orientée objet. Son seuillage à 98% constitue le meilleur compromis par une réduction des erreurs de commissions et d'omissions. En revanche, elle crée une confusion pour certaines routes goudronnées intra et extra-urbaines qui s'agglomèrent avec les surfaces bâties (Figure 83).

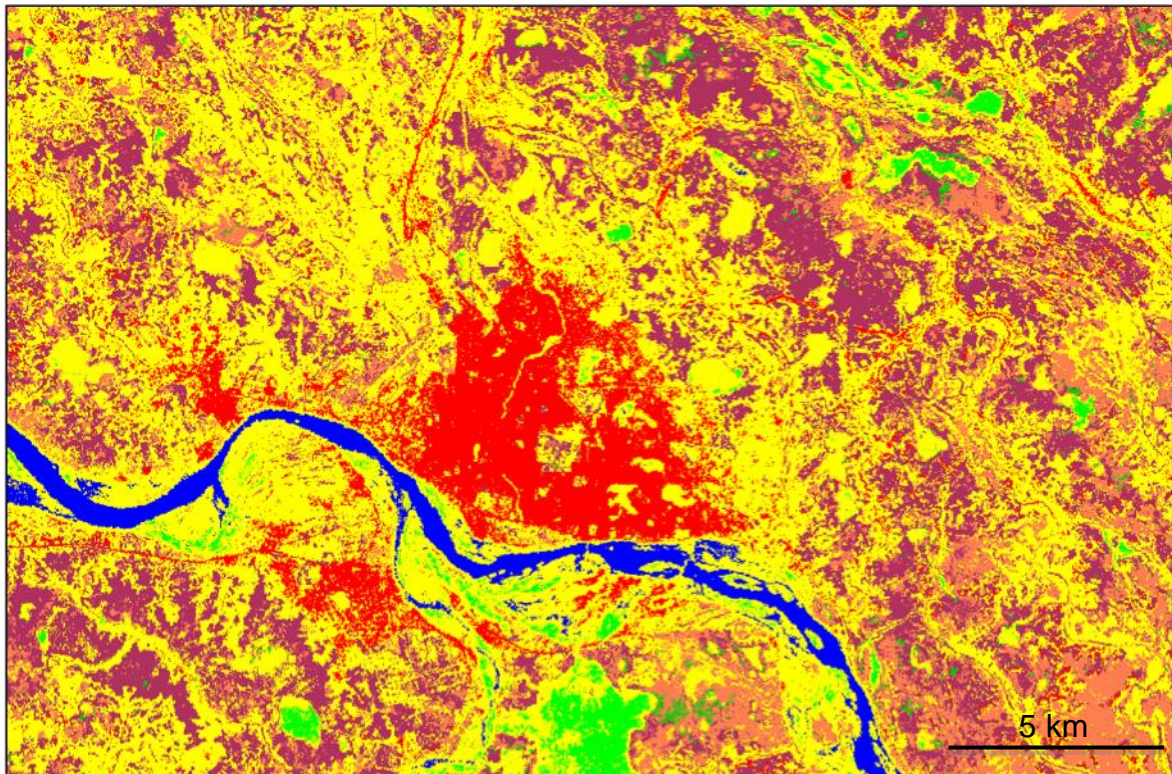


Figure 83 : Résultat de la classification par maximum de vraisemblance de l'image Landsat d'octobre 2001 sur N'Djaména.

Les résultats de la classification seuillée à une probabilité de 98% fournissent une cartographie satisfaisante des zones urbaines. Les textures des zones d'habitations du centre de N'Djaména, de sa banlieue étendue au nord-ouest et de Kousséri sont parfaitement reproduites.

4.1.3.4.2. Portée spatiale

Le résultat obtenu sur N'Djaména-Kousséri est intéressant car la quasi-totalité des prises de vue Landsat disponibles sur les serveurs en ligne pour le Tchad méridional ont été acquises entre fin août et fin novembre.

Nous avons reproduit la chaîne de traitement (néocanaux et classification bayésienne) sur les villes rurales des régions du Chari et de l'Ouaddaï. Malgré la taille réduite de ces zones urbaines, la différence de paysage et de dates de prises de vues, leur détection est très satisfaisante (Figure 84, Figure 85).

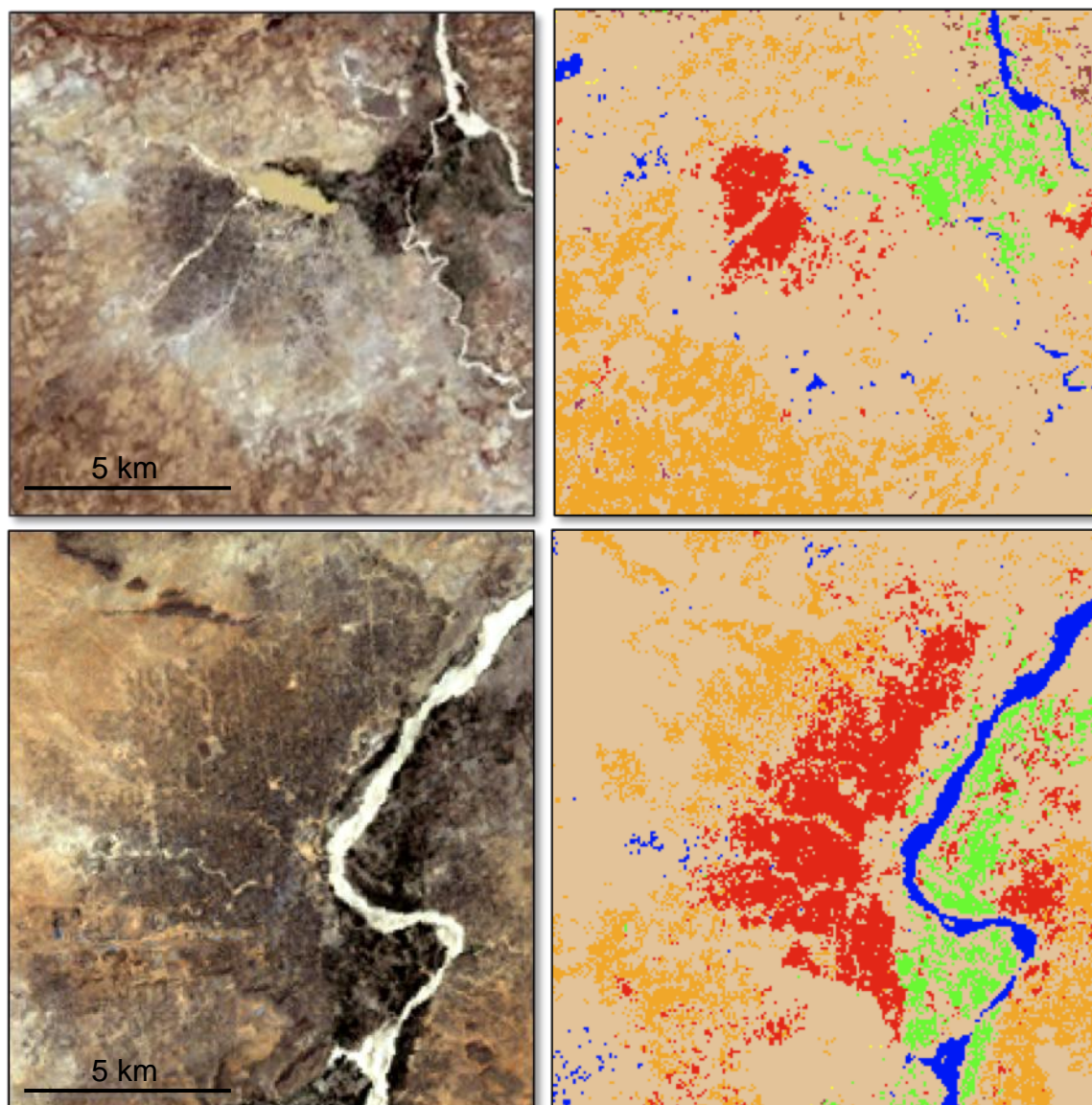


Figure 84 : Identification des villes d'Adré (en haut) et Al-Junaynah (en bas) dans l'Ouaddaï, par maximum de vraisemblance, seuillée à 98%.

Les images de gauche sont des compositions en vraies couleurs du capteur Landsat ETM+. Sur cette image du 12 décembre 1999, la végétation est limitée aux zones marécageuses. La proximité spectrale entre le sol nu et la couronne extérieure des zones urbaines se traduit par une confusion spectrale de ces deux éléments. La superficie des villes est alors légèrement sous-évaluée.

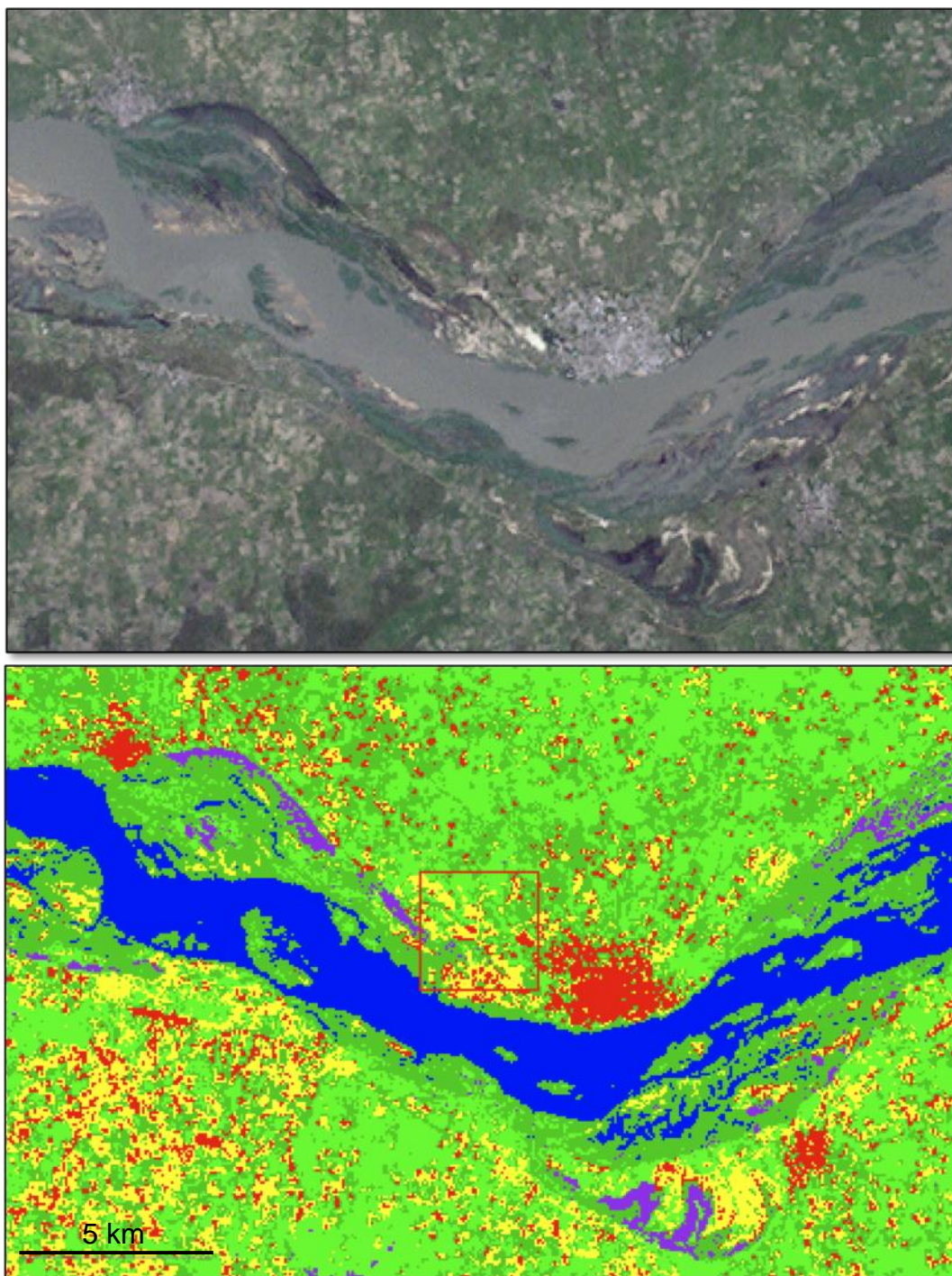


Figure 85 : Identification de la ville de Bousso et des villes rurales avoisinantes (rives du Chari) par imagerie Landsat 7 ETM+

Codage en vraies couleurs (en haut). La ville de Bousso, répartie de chaque côté du fleuve Chari, est parfaitement reconnue par classification. La proximité des sols nus de culture après récolte et des zones urbaines surévalue légèrement la superficie de ces dernières.

4.1.4. Obstacles hydriques

4.1.4.1. Introduction

La caractérisation des barrières hydriques pour la traficabilité fait appel à un compromis entre les régimes hydriques des cours d'eau du Tchad méridional, les moyens techniques d'observation satellitaire de ces régimes et les pratiques locales de franchissement. La méthodologie de cartographie de ces obstacles tient compte de ces aspects. Nous considérons ainsi deux types d'obstacles hydriques (Figure 86):

- les **cours d'eau pérennes** qui fluctuent entre une période d'étiage située au mois de janvier et une période de crue, située entre les mois d'août au niveau de Laï, pour le Logone, et de novembre à N'Djaména, pour le Chari (Fekete *et al.*, 2006). Sur le territoire tchadien, le Chari et ses affluents occidentaux majeurs (Logone, Mandoul, Ba Illi et Tandjilé) font partie de cette catégorie (Olivry *et al.*, 1996). En période d'étiage, l'écoulement de ces rivières n'est jamais nul (Bouchardeau *et al.*, 1968). En période de crue, le fleuve occupe le lit majeur. Ses débordements sont exceptionnels depuis 1995. Les zones en dépression de la plaine d'inondation sont ennoyées par remontée de la nappe alluviale ;
- les **laissées et laisses de marais**. Ces mares d'eau stagnantes sont remplies d'eau toute l'année. Les sols des laisses de marais ont une nature granulométrique plus fine que les laissées (Welcomme, 1975). En période de crue, ces étangs sont recouverts par une végétation marécageuse. Elles sont connectées au fleuve soit directement en surface, soit par l'aquifère libre du système alluvionnaire (Massuel, 2001).



Figure 86 : Vue du fleuve Logone à Laï, par imagerie Quickbird, datée du 11 septembre 2006
Le niveau du fleuve est ici à son maximum saisonnier. La zone marécageuse qui s'étend du lit principal aux laissées est ennoyée car elle est située au niveau altimétrique du fleuve. Plus loin, seuls les chenaux (ou laisses de marais) sont remplis par l'eau.

Cette sélection exclut les éléments hydriques temporaires, dont l'extension spatiale sera estimée par imagerie radar. Leur évolution extrêmement rapide (parfois moins de 3h) ne permet pas une approche par modèle hydrologique ou imagerie optique. Ces éléments sont :

- les **plaines d'inondation**. La caractérisation des secteurs inondables par un simple seuillage des MNT a été exclue, du fait des très faibles dénivelés de la zone. La hauteur d'eau maximum constatée est comprise entre 0,7 et 1,1 m d'eau, dans la plaine des Yaérés (Sighomnou, 2003) ;
- les **oueds** dont le régime hydrologique dépend principalement de l'intensité des précipitations. Dans les régions arides de l'Ouaddaï et du Salamat, des averses éclairs génèrent un ruissellement de surface important, guère atténué par une végétation éparse. En réaction, une fine lame d'eau de ruissellement pluvial recouvre uniformément le paysage avant de se canaliser dans les talwegs. Ces écoulements sont éphémères. Les oueds sont secs dix mois sur douze. Ils ne se chargent que lors des fortes précipitations de mousson durant les mois d'août-septembre. Elles occasionnent des crues spectaculaires dans les régions du Salamat. Tous les affluents amont et orientaux du Chari (Bahr Aouk, Bahr Keita et Bahr Salamat) répondent aux caractéristiques hydrologiques des oueds (Figure 87).

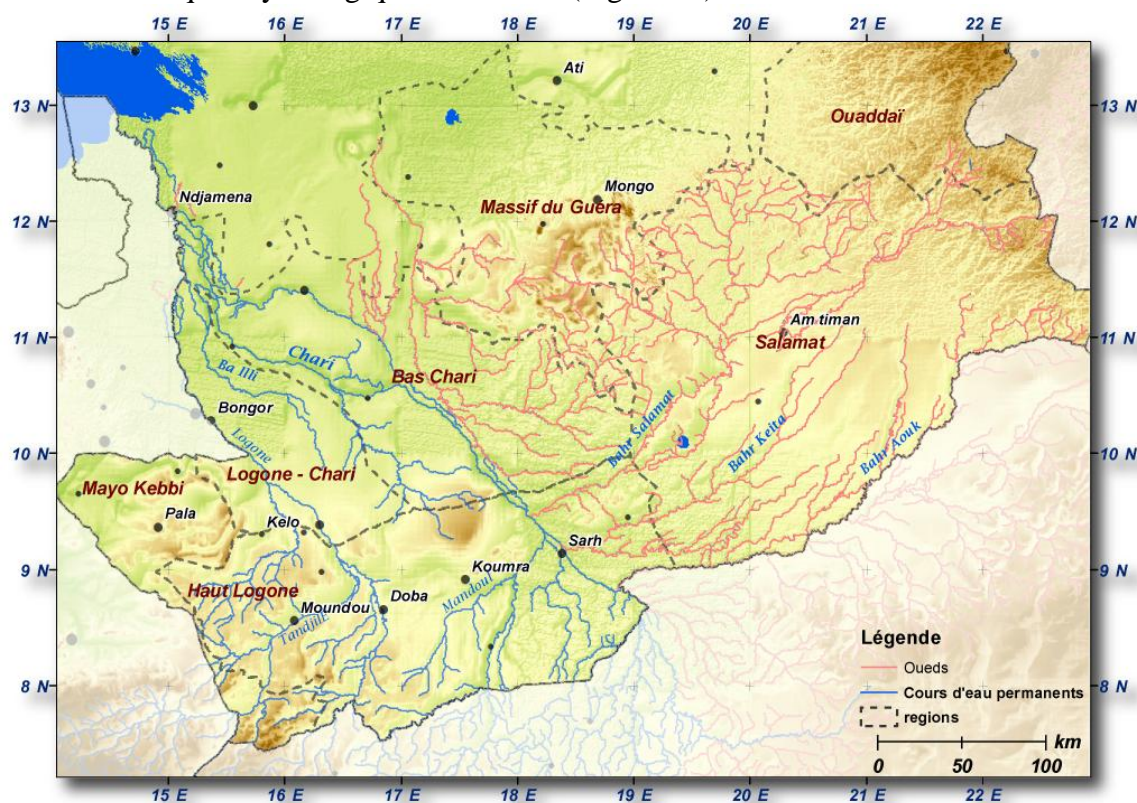


Figure 87 : Répartition des cours d'eau pérennes et intermittents, affluents du Chari.
Les affluents occidentaux du Chari prennent leur source au Cameroun ou en République centrafricaine. Ils conservent un débit minimal tout au long de l'année. A l'inverse, les affluents orientaux prennent leur source au Ouaddaï et dans la partie orientale de la République centrafricaine. Ils sont secs environ 10 mois de l'année.

4.1.4.2. Propriétés spectrales de l'eau de rivière

Le comportement spectral de l'eau claire se caractérise par une très forte absorption dans tout le spectre optique et thermique (Lillesand *et al.*, 2007). Les écarts de réflectance les plus importants entre les matériaux solides terrestres, la végétation et l'eau libre se manifestent dans les longueurs d'onde de l'infrarouge proche (Scanvic, 1986). Localement, les surfaces de brûlis, faiblement réfléchissantes, peuvent se confondre avec l'eau libre dans le spectre du visible.

Les caractéristiques spectrales de l'eau claire rendent son extraction relativement aisée par des procédés simples d'indices spectraux ou de seuillage. Or, dès les premières semaines de mousson, les cours d'eaux principaux charrient d'importantes quantités de sédiments en suspension. L'eau de rivière devient alors turbide et sa réflectance augmente (Figure 88) dans les bandes d'absorptions 630-690 nm (rouge) et 1150-1350 nm (infrarouge moyen). Le profil spectral de l'eau turbide se rapproche alors de celui des argiles saturées en eau (Bustamante *et al.*, 2007). Une approche par indice infrarouge/visible permet de séparer efficacement ces deux entités (Hellweger *et al.*, 2007). Par ce procédé, la détection des surfaces d'eau libre par le capteur Landsat est d'environ 80% (Yoon *et al.*, 2003; Gianinetto *et al.*, 2006).

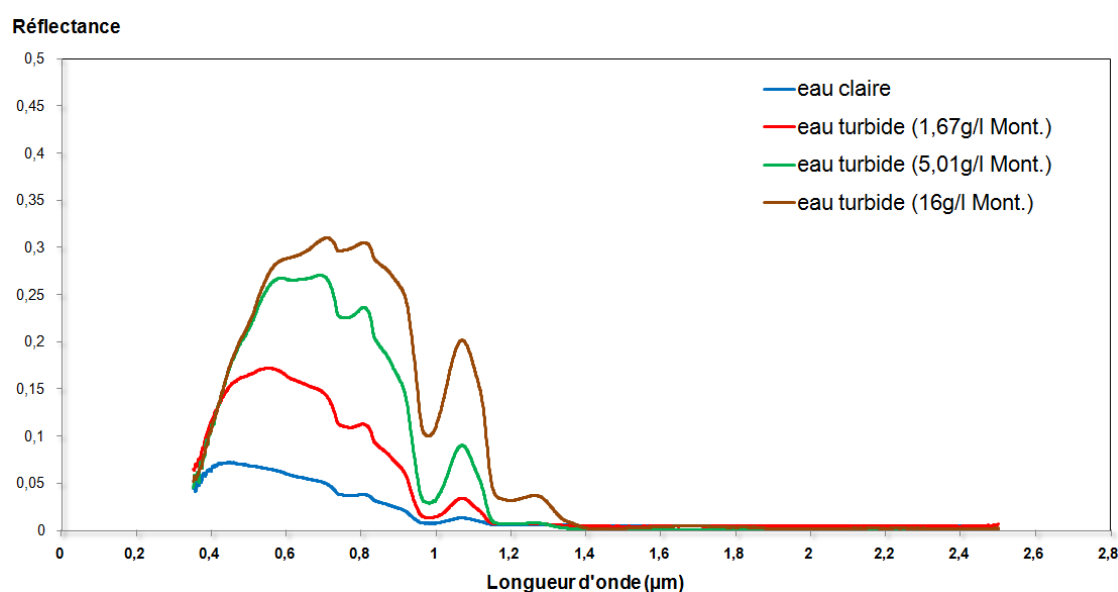


Figure 88 : Profils spectraux expérimentaux de l'eau claire et de l'eau turbide (Clark *et al.*, 2007)

La turbidité croissante de l'eau accroît tout d'abord sa réflectance dans les longueurs courtes du spectre visible (0,5-0,6 μm), puis dans le rouge (0,7- 0,8 μm), et enfin dans l'infrarouge proche (0,8-1 μm). Les mesures hydrochimiques relevées pour le fleuve Chari en période de crue varient de 15 à 22 g/l de sédiments argileux (Bouchardeau, 1967), dont la composition est essentiellement de la Montmorillonite.

4.1.4.3. Méthodologie

Nous avons donc cherché à extraire l'eau de rivière turbide à partir d'un indice des bandes infrarouges et visibles du capteur Landsat ETM+. Pour établir quel était le meilleur indice parmi les neuf combinaisons possibles, nous nous sommes appuyés sur la mesure de séparabilité des classes de sol nu, eau et végétation. Plus la séparabilité entre deux classes est élevée, et moins la confusion entre ces classes (ou cluster) est élevée.

Cette séparabilité est estimée par la Divergence Transformée (Richards *et al.*, 2006). Nous l'avons calculée pour chaque combinaison d'indices infrarouge/visible ainsi que pour les trois groupes d'échantillons (Tableau 8). Le test est initié sur l'image de la plaine du Logone.

La divergence transformée s'écrit :

$$d_{ij}^T = 2 \left(1 - e^{-\frac{d_{ij}}{8}} \right)$$

Où d_{ij} est la divergence d'une paire d'agrégats :

$$d_{ij} = \frac{1}{2} T_r \left\{ \left(\sum_i - \sum_j \right) \left(\sum_j^{-1} - \sum_i^{-1} \right) \right\} + \frac{1}{2} T_r \left\{ \left(\sum_i^{-1} + \sum_j^{-1} \right) (m_i - m_j) (m_i - m_j)^t \right\}$$

$T_r\{\}$ est la trace de la matrice,

m_i , \sum_i , m_j et \sum_j moyennes et covariances respectives des groupes d'agrégats $p(x / \omega_i)$ et $p(x / \omega_j)$.

<i>Divergence Transformée</i>		
Combinaisons	<i>eau/sol nu</i>	<i>Eau /végétation</i>
4/1	1,97487	1,99675
5/1	1,93727	1,94653
7/1	1,92973	1,93563
4/2	1,94952	1,96964
5/2	1,95288	1,94876
7/2	1,94799	1,95747
4/3	1,97675	1,99749
5/3	1,96786	1,97977
7/3	1,97297	1,95783

Tableau 8 : Calcul de la Divergence Transformée entre deux groupes d'échantillons pour 9 combinaisons spectrales

Ces divergences sont calculées à partir de classes d'échantillonnages sélectionnées aléatoirement mais limitée à 20000 pixels par classe. Les valeurs de divergence transformée évoluent théoriquement entre 0 (classes strictement identiques) et 2 (séparation parfaite). La séparabilité de deux groupes de clusters est faible lorsqu'elle est inférieure à 1,9. Sur ce tableau, la séparabilité des paires est bonne quel que soit la combinaison d'indices considérée.

4.1.4.4. Résultats et validation

Les séparabilités les plus fortes entre les classes de végétation, eau et sols nus argileux sont obtenues par l'indice 4/3 (Figure 89). L'extraction des barrières hydriques selon cette combinaison minimise donc les erreurs de confusion. Cet indice, déjà employé pour la reconnaissance pédologique des sols, fait donc double emploi. Son seuillage à la valeur 0,47 permet de séparer efficacement l'eau libre des autres surfaces d'occupation du sol.

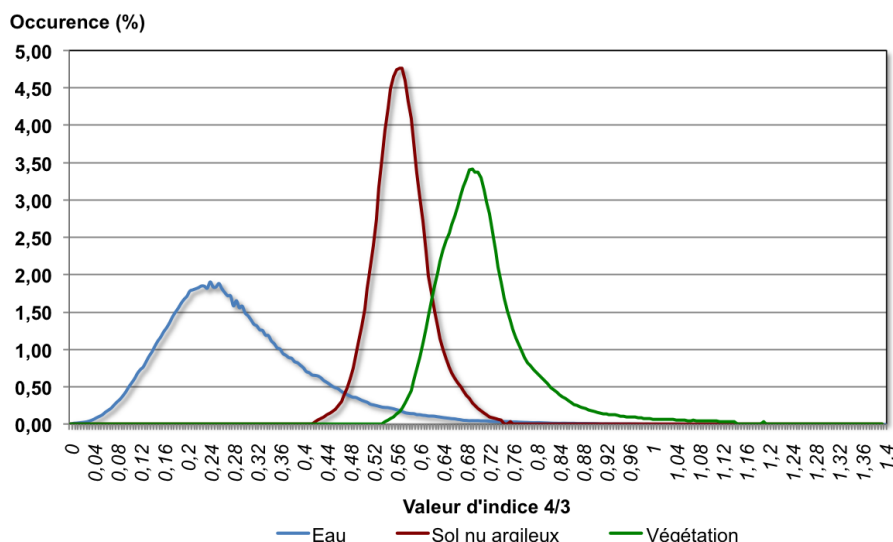


Figure 89 : Distribution des valeurs d'indice 4/3 pour trois groupes d'occupation du sol.

La séparation des agrégats végétation/eau et sol/eau est beaucoup plus évidente que la séparation sol/végétation pour cet indice. Les valeurs d'indice supérieures à 0,47 pour le groupe eau sont dues à une erreur de mixage des pixels de la rivière et la rive. La distribution lognormale des classes de végétation et d'eau a été assimilée, pour le calcul de la divergence, à une distribution normale.

Nous avons appliqué cette méthode sur les huit images Landsat couvrant les affluents de la rive occidentale du Chari. Les barrières hydriques extraites sont parfaitement continues d'une image à l'autre, et ce quel que soit leur date de prise de vues. L'importance de ces barrières est cependant variable selon la saison (Figure 90 , Figure 91).

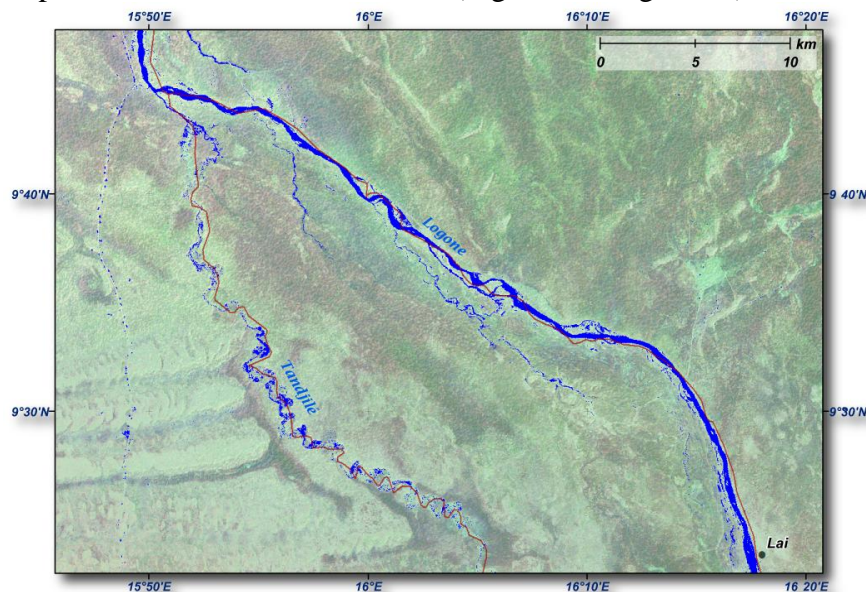


Figure 90 : Détail de l'extraction des barrières hydriques sur la région de Lai, à la confluence du Logone et du Tandjilé par indice 4/3 seuillé

L'extraction des barrières hydriques par indice 4/3 est superposée à une composition en vraie couleur du 28 septembre 2001. Le lit principal du Logone occupe ici en moyenne une section de 500 m de large. Le cours méandrique du Tandjilé forme, avec ses laissées, une barrière hydrique au moins aussi large que le Logone. Les pointillés alignés le long de la route nord-sud, à l'ouest de cet extrait sont des mares artificielles servant aux cultures. Nous pouvons constater que les barrières hydriques interprétées par imagerie multispectrale sont plus nombreuses que les cours d'eau de référence du projet AMMA (African Monsoon Multidisciplinary Analysis), reportées sous forme vecteur.

L'indépendance du seuillage par rapport aux dates de prises de vues se modère par une faible représentativité saisonnière des neuf images que nous avons à notre disposition. Ces dates s'étalent de 1999 à 2002, mais correspondent à la fin de saison des pluies, soit entre le 28 septembre et le 26 novembre.

Pendant ces deux mois, l'arrêt brutal des précipitations et le retour d'une évaporation intense réduisent fortement les apports en eau des rivières. Ce retard de débit provoque une augmentation des erreurs de détection. Elle s'explique par deux phénomènes :

- la **largeur des cours d'eau** les plus importants (Logone, Chari, Tandjilé, Pendé, Mandoul) est divisée au minimum par deux entre la fin septembre et la fin novembre, quelle que soit l'année. Par ailleurs, la proximité spectrale de l'eau turbide et de l'argile composant les rives nues ou les îlots, provoque une confusion spectrale entre ces deux entités. Nous avons observé que ces deux phénomènes conjugués ont pour conséquences de repousser le seuil minimal de détection du capteur Landsat ETM+, en théorie équivalent à sa résolution, soit 28,5 m, par un facteur 3. Les cours d'eau inférieurs à cette largeur ne sont alors pas détectés ;
- La **végétation** envahit le lit principal des cours d'eau mineurs au fur et à mesure de la décrue. A terme, elle les recouvre entièrement. Cette décrue passe par une étape intermédiaire de fragmentation du cours d'eau en marigots stagnants qui accélère le processus d'évaporation. Ces cours d'eau ne sont alors plus détectés en tant que barrière hydrique car leur profil spectral correspond à la végétation.

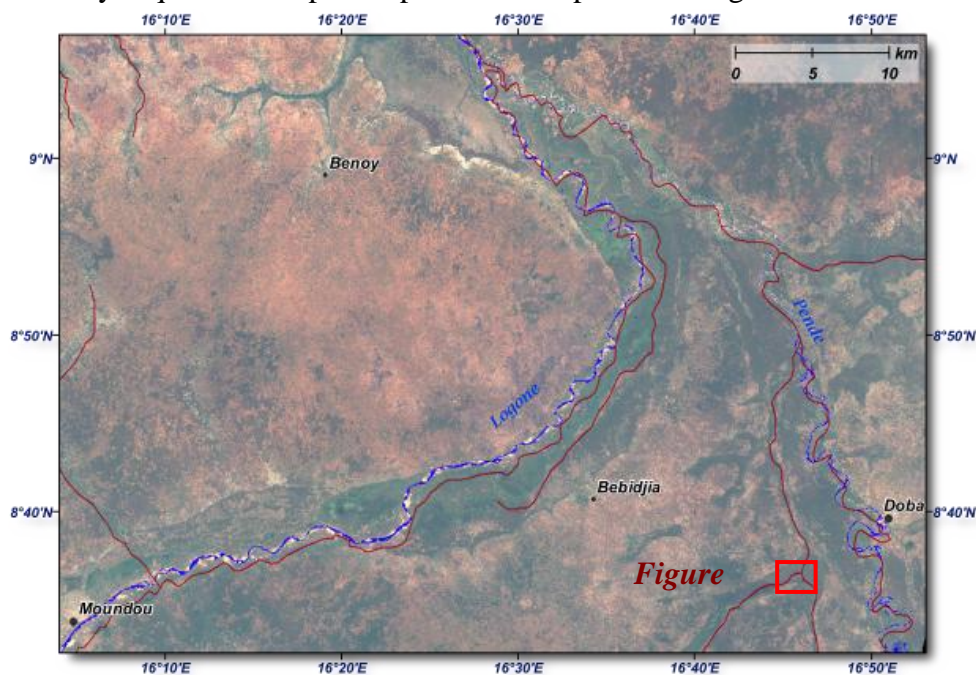


Figure 91 : Détail de l'extraction des barrières hydriques sur la région de Doba, à la confluence du Logone et de la Pendé

Les barrières hydriques extraites par l'indice 4/3 sont superposées à une composition en vraies couleurs du 26 novembre 1999. Le cours du Logone est ici réduit à son lit mineur. Son cours tortueux serpente entre les ondulations de laisses qui occupent souvent plus de la moitié de la largeur de son cours principal. A l'inverse de l'image précédente, les barrières hydriques extraites par imagerie Landsat sont moins nombreuses que les cours d'eau de référence du projet AMMA. Nous avons observé par imagerie THR (Figure 92) que ces cours d'eau sont mineurs, et trop fins pour être détectés par imagerie Landsat. Une représentation du réseau hydrographique sous forme vecteur n'est donc pas satisfaisante car elle ne tiendrait pas compte des variations de largeur des cours d'eau (tous les cours d'eau seraient alors notés comme infranchissables). Dans l'idéal, une couverture d'au moins deux images (fin de saison des pluies et pleine saison sèche) permettrait d'extraire les cours d'eau en crue et à l'étiage.



Figure 92 : Affluents mineurs de la Pendé à Doba sur image Quickbird du 22 décembre 2005.

En pleine saison sèche (les brûlis le confirment), ces cours d'eau sont toujours en eau, bien que réduits à moins d'un mètre de large. Cependant, ce sont bien la nature des alluvions et le relief des terrasses qui déterminent la difficulté de leur franchissement, et non la largeur du cours d'eau.

4.1.5. Compilation des éléments thématiques de l'occupation du sol

Nous avons extrait séparément les éléments thématiques de l'occupation du sol (Figure 93) à partir de l'imagerie Landsat et MODIS. Ces éléments se caractérisent d'une part par des surfaces de sol, végétalisés ou non, dont les conditions d'humidité détermineront la traficabilité, et d'autre part, des surfaces d'obstacles :

- La combinaison de trois indices spectraux seuillés, 5/7, 5/1 et 4/3, a permis de discriminer et d'identifier les différentes **classes pédologiques**, pour la région de Lai. La transposition des classes pédologiques aux classes géotechniques de **sols LPC/USCS** est réalisée à partir de l'interprétation des données d'échantillons issues des profils pédologiques (cf chapitre 3). Une valeur moyenne de résistance à la pénétration au cône (IC) est associée à chaque classe de sol (cf partie 4). L'application de la combinaison d'indices à d'autres régions du Tchad méridional fera l'objet du chapitre 5 ;
- la restitution cartographique des **obstacles végétaux** (herbacés et arborés) et de la **densité de racines** est produite à partir du seuillage et de la transformation de l'indice EVI. Cette restitution est réalisée en continu tous les 16 jours ;
- les **zones urbaines** sont extraites des images Landsat par classification supervisée. La création d'un filtre laplacien de la 5^e composante de l'analyse en composante principale des 9 canaux d'une scène Landsat améliore la classification. La production de néocanaux n'apporte pas d'informations complémentaires. Les différences de densité des agglomérations urbaines sont reconnues. A l'échelle régionale, les zones urbaines sont considérées comme des obstacles à contourner.
- les **barrières hydriques permanentes** sont extraites des images Landsat par seuillage de l'indice 4/3. Seuls le Chari et ses affluents occidentaux font partie de cette catégorie. La portée de cette méthode a été étendue sur la couverture Landsat 7 ETM+ des affluents occidentaux du Chari, soit 8 images.

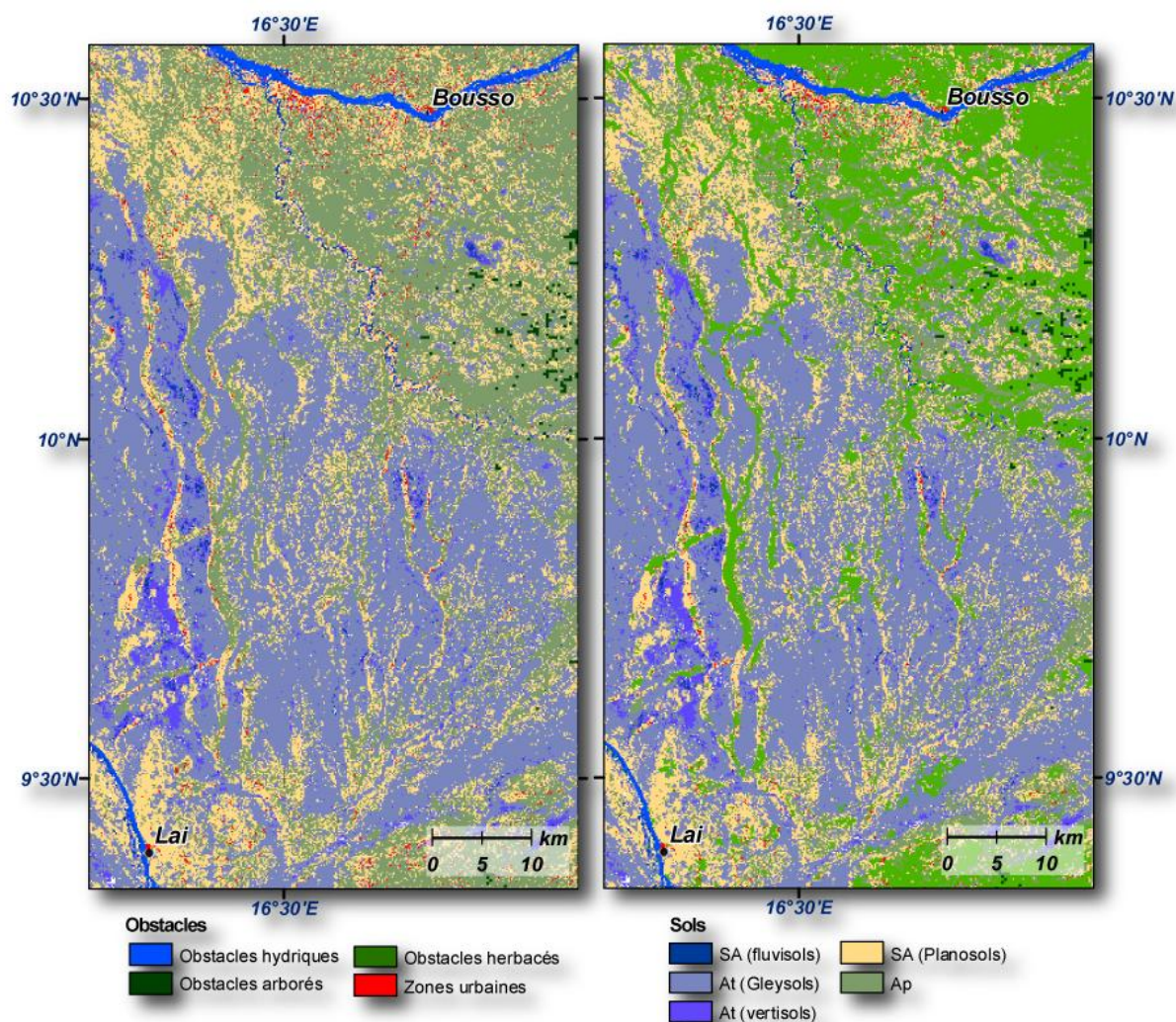


Figure 93 : Occupation du sol thématique, réalisée à partir des images MODIS du 10 avril et 2 août 2008 et du capteur Landsat 7 ETM+ du 26 septembre 2001, centrées sur Lai.

En zone peu arborée, la végétation ne pose réellement un problème de franchissement qu'en pleine saison humide (août, image de droite). Elle se concentre sur les buttes exondées, occupées par des planosols. Les regroupements de fermes agricoles, séparées des zones urbaines de Lai et Bouso, se répartissent sur toutes les zones exondées.

4.2. Extraction de l'occupation du sol à l'échelle métrique à partir d'imagerie Très Haute Résolution

Le protocole de traitement que nous avons mis en place à partir d'imagerie moyenne et basse résolution à l'échelle régionale apporte une restitution efficace de l'occupation du sol. Cependant cette interprétation est incapable de reproduire les problèmes de traficabilité à un niveau local. L'imagerie Landsat ne permet pas de détecter les objets ou obstacles inférieurs à trois pixels, soit 90m environ.

L'imagerie Très Haute résolution apporte alors une vérité terrain par une identification « visuelle » des éléments de surfaces. Trop petits pour apparaître sur une carte, ils sont toutefois suffisamment importants pour constituer un obstacle au franchissement, ou un ralentissement. Elle permet également de détecter les équipements routiers : buses d'évacuation des eaux, accotements, digues,... (Sedant, 2006). Leur importance dans le diagnostic de traficabilité est stratégique (Figure 94).



Figure 94 : Buse en béton d'évacuation des eaux de pluies, N'Djaména

Ce type d'équipement est observé sur la plupart des nouvelles infrastructures routières récentes du Tchad (Photo terrain 9 octobre 2008). Ils sont identifiables par photo-interprétation de l'imagerie Quickbird

L'utilisation de l'imagerie THR permet d'une part d'effectuer un contrôle de validation sur l'analyse moyenne résolution, en dimensionnant les erreurs d'estimation par une information plus récente et mieux résolue. Son rôle est alors équivalent à celui d'une campagne de terrain. Elle apporte d'autre part un diagnostic local et précis de l'analyse de traficabilité.

Ce type d'imagerie est aujourd'hui largement disponible par le biais des globes virtuels, Google Earth notamment, ce qui présente un double intérêt. D'un point de vue statistique, ces prises de vues sont nombreuses (la couverture sur le Tchad méridional représente plus de 50 000 km² au 1 juillet 2009) et réparties sur des zones variées (pas seulement sur des zones urbanisées). Par ailleurs, les prises de vues sont récentes (2005-2009), rarement nuageuses, et mises à jour régulièrement sur les agglomérations, où se concentrent spécifiquement la majorité des problèmes de traficabilité. L'utilisation de cette imagerie dans un contexte opérationnel est donc une manne non négligeable.

L'imagerie du capteur Quickbird représente aujourd'hui la première source d'imagerie inframétrique sur la zone d'étude. Nous avons ainsi pris l'option de mettre en place une méthode d'interprétation de l'occupation du sol adaptée à ces sources diffusées par le biais du globe virtuel. Il n'existe cependant aujourd'hui aucune étude qualifiant ce type d'imagerie pour l'interprétation.

C'est pourquoi notre démarche implique en premier lieu cette qualification. Une seconde phase se focalise alors sur l'extraction des objets et la discrimination des types de surfaces. L'interprétation est évaluée par trois critères spécifiques. La méthode ou combinaison de méthodes de classification satisfaisant ces critères sera retenue. Elle est ensuite appliquée à plusieurs paysages.

4.2.1. Interprétation de l'occupation du sol par imagerie Quickbird : état de l'art et protocole de traitement

L'interprétation de l'imagerie Quickbird vise l'identification des surfaces et des objets influençant la traficabilité. La cartographie de ces éléments est soumise à un double type de contraintes :

- des **contraintes techniques** induites par la présentation de l'imagerie sur globe virtuel. La résolution spatiale initiale de l'imagerie THR en vraie couleur sur Google Earth est de 60cm. Or, la résolution à l'affichage de la zone à extraire est définie par l'opérateur. De plus, l'image a pu subir un certain nombre de modifications radiométriques et géométriques pour les besoins de sa diffusion. Pour l'instant l'unique moyen de se procurer ces images passe par une impression d'écran. Dans le futur, leur téléchargement s'effectuera par l'intermédiaire d'un service. L'optimisation de l'échelle d'affichage, ainsi que l'estimation de ces transformations font l'objet de la première phase du protocole de traitement ;
- des **contraintes d'observation** des éléments de l'occupation du sol. L'identification visuelle des objets implique un effort de synthèse très important. Leur regroupement par classe prend en compte leurs propriétés spectrales, mais également leur continuité sans l'espace.

4.2.1.1. Etat de l'art des techniques opérationnelles d'interprétation de l'occupation du sol par imagerie Quickbird

L'imagerie Quickbird présente, pour l'occupation du sol, un problème lié à sa résolution. Sur les images de moyennes résolution traditionnelles de type Landsat ETM+, les données de terrains sont échantillonnées selon une grille régulière puis corrélées avec la signature spectrale du point considéré. La valeur du pixel est une moyenne de la réflectance des éléments couverts par ce pixel. Ce qui ne pose généralement pas de problème d'interprétation pour des espaces ouverts. En revanche, le détail de l'imagerie Très Haute résolution est tellement précis qu'il rend ce travail de terrain inefficace (Meisman, 2002). Les travaux se sont donc ciblés sur le développement d'algorithmes de réduction de ce détail tout en conservant un maximum d'informations utiles à la discrimination des objets. Chacun de ces algorithmes possède ses atouts et faiblesses pour l'extraction des éléments de l'occupation du sol (traitement de l'image, contraste, temps de calcul, niveau d'expertise de l'utilisateur, niveau de connaissance a priori de la scène...).

4.2.1.1.1. Techniques non supervisées

La première de ces techniques prend le parti de ne pas inclure l'expert dans la classification. La **classification non supervisée** (ou non dirigée) est une technique d'agrégation de groupes de pixels (clustering).. Pour l'interprétation de l'occupation du sol à Très Haute Résolution, la méthode la plus utilisée dérive de l'algorithme itératif des **K-means** (Steinhaus, 1956; Llyod, 1982). Une correction de l'image au niveau de l'ombrage topographique (Meisman, 2002; Wulder *et al.*, 2004) est néanmoins nécessaire pour obtenir une classification cohérente des agrégats de l'image.

Les **réseaux de Kohonen** (Kohonen, 1982; 1989), utilisent les relations de voisinage pour réaliser une discrétisation de l'espace, organisé en treillis où chaque nœud est occupé par un neurone. Pour l'extraction de l'occupation du sol par imagerie, cette méthode n'est adaptée qu'au traitement de données obéissant à des lois de distributions statistiques des pixels différentes, dans le cas d'une topographie accidentée (Iftene, *et al.*, 2003), ou d'hétérogénéité des systèmes de mesures par exemple (Nogami *et al.*, 1997; Goncalves, *et al.*, 2008), ce qui n'est pas le cas dans notre étude.

Une autre technique ne fait intervenir l'expert que pour la phase d' « étiquetage » des échantillons. Elle est précédée par une segmentation automatisée de l'image.

La **segmentation** a pour objectif de partitionner l'image en régions (ou segments). Chaque région rassemble ainsi les pixels de caractéristiques propres, de couleur, forme, taille ou texture identique. La séparation des objets d'une image est un problème de perception cognitive, dont une solution ne peut être apportée par un raisonnement purement analytique. Les algorithmes de segmentation font appels à des connaissances dites de haut niveau *a priori* et des informations sémantiques du sujet à traiter, ce qui les rend particulièrement efficace dans l'analyse d'image THR. Dans le domaine de l'occupation du sol par imagerie THR, quatre grands types d'algorithmes font l'objet d'une recherche attentive :

- La **segmentation par région de type décomposition/fusion** (split and merge). Elles exploitent les caractéristiques de forme, de texture et de spectre propres à chaque région (Cross & Mason, 1988). Ces régions sont ensuite fusionnées de proche en proche jusqu'à répondre à une condition ou atteindre un seuil prédéfini. Pour la classification de l'occupation du sol, l'intervention de l'expert sur le seuillage des paramètres par logique floue adaptive (Wuest & Zhang, 2008), ou sur le degré de segmentation (Wuest, 2008) a démontré une amélioration significative par rapport à une partition automatisée (Hu, *et al.*, 2005).
- La **segmentation multi-résolution**. Elle est basée sur l'hypothèse qu'à faible résolution la perception de l'arrière plan est caractérisée par des attributs de couleur ou texture uniformes. Les espaces de basse résolution sont généralement obtenus par un processus de pyramidage de l'image initiale, ou par sa transformée en ondelettes. Ce type de segmentation est implémenté dans le logiciel eCognition (Batz & Schäpe, 2000; Definiens Imaging GmbH, 2002). Pour l'interprétation de l'occupation du sol par imagerie THR, le partitionnement multi-échelle de l'image renforce les relations topologiques entre régions en ciblant les limites de zones de transitions *a priori* (Li & Xiao, 2007; Nabil, Sarhan, & Darwish, 2007; Tian & Chen, 2007).

- La **segmentation par ligne de partage des eaux** (Beucher & Lantuéjoul, 1979; Beucher & Meyer, 1993). L'image de niveau de gris est considérée en tant que surface topologique. L'intensité du gradient est interprétée en tant que valeur d'altitude. Les séparations entre les bassins versants constituent ainsi les lignes de partage des eaux. Les différents algorithmes (Meyer, 1991; Vincent & Soille, 1994; Najman & Schmitt, 1994) calculent la position de cette ligne, en simulant un comportement hydrologique (inondation, ruissellement).
- La **segmentation par détection de contours**. Elle consiste à détecter la transition entre deux régions connexes. Cette transition est généralement mise en évidence par un filtre (Canny, 1986) ou une courbe paramétrique (Lim, *et al.*, 1990). Le processus est initié par une recherche des points d'intersection entre les régions. Ce type de segmentation a tendance à créer des régions de tailles hétérogènes (Mo, *et al.*, 2007). Au Tchad méridional, où les transitions de paysages, observées sur imagerie THR, sont très rapides, cette caractéristique fait office d'avantage majeur. De plus, les optimisations successives de cet algorithme ont amélioré sa vitesse d'exécution (Jensen, 2005; Karantza & Argenti, 2006). Il est implémenté dans le logiciel ENVI.

Ces types d'algorithmes de segmentation sont bien adaptés pour l'extraction de l'occupation du sol par imagerie THR. Toutefois, ils ne sont spécifiques que pour des cas bien précis, de ce contexte, pour lequel un haut niveau de connaissance a priori est requis : fusion avec Landsat ETM+ (Van den Steen, *et al.*, 2001; Her & Heatwole, 2007), Quickbird panchromatique (Baillouel, *et al.*, 2005) ou extraction d'un seul type d'objet (North, *et al.*, 2005).

Les évaluations des résultats de segmentation ont montré que les algorithmes de détection de contours sont plus proches du découpage psychovisuel de l'image (Huang & Dom, 1995; Zhang, 1996; Ji & Haralick, 1999; Letournel, *et al.*, 2002; Yong, *et al.*, 2004). Nous utiliserons donc ce type d'algorithme pour la segmentation de nos images THR.

4.2.1.1.2. Classifications et techniques supervisées

Le principe du processus supervisé consiste à faire intervenir l'expert dans le processus de classification (Jensen, 2005). Il apporte alors un jugement sur ce qu'il perçoit. Il oriente ainsi l'analyse discriminante par une connaissance a priori pendant la phase l'échantillonnage. Cependant, ce jugement a tendance à produire un biais, partiellement compensé par le seuillage des algorithmes probabilistes bayésiens (Lillesand, *et al.*, 2007). Toutefois, certaines techniques de classification permettent de largement minimiser ce biais : les Machine à Vecteurs de Support et la logique floue.

Les **Machines à Vecteurs de Support, ou SVM** (Vapnik, 1995), consistent à résoudre le problème de discrimination des clusters de l'image en déterminant un hyperplan optimal. L'algorithme cherche l'hyperplan qui maximise la marge entre les différentes classes, à partir d'un ensemble d'apprentissage (Boser, *et al.*, 1992). Dans le cas où les données ne sont pas linéairement séparables, l'espace de représentation est transformé en un espace de plus grande dimension dans lequel il existe une séparatrice linéaire. Cette transformation est réalisée par une fonction noyau (linéaire, gaussien, polynomial, laplacien, base radiale...).

Les SVM se sont rendus utiles pour la classification de l'occupation du sol par trois particularités :

- Leur fiabilité. Cet algorithme permet une classification à partir d'un très petit ensemble d'apprentissage (<1%). Une augmentation de l'échantillonnage ne produit que des changements mineurs sur les résultats de la classification ;
- Leur souplesse. Les SVM sont fortement paramétrables (fonction du noyau, paramètres du noyau, paramètres d'optimisation). Pour les classes multimodales d'occupation du sol, les meilleurs résultats sont obtenus avec une fonction noyau à base radiale (Lizarazo, 2008; Shafri & Ramle, 2009) ;
- Le temps de calcul reste raisonnable, malgré l'intégration d'un espace de grande dimension, dans le cas d'images hyperspectrales (Gualtieri & Crompt, 1998) ou des données multisources (He, *et al.*, 2005).

La **logique floue** (Zadeh, 1965), permet d'assigner des degrés de conditions. Elle se base sur la théorie des ensembles flous, qui modélise le degré d'appartenance à une partie d'un ensemble par une fonction. Cette valeur, comprise entre 0 et 1, sera d'autant plus élevée que les conditions sont réunies pour l'appartenance de ce sous-ensemble à telle classe. La fonction d'appartenance, qui correspond à la transition entre les ensembles, peut être linéaire, hyperbolique, gaussienne ou exponentielle. A l'issue d'une classification orientée objet par logique floue (Definiens Imaging GmbH, 2002), chaque segment reçoit une valeur d'appartenance à une classe donnée, en fonction de ses propres valeurs d'attributs, et des attributs de chaque classe d'apprentissage.

4.2.1.2. Protocole de traitement

Le protocole d'extraction de l'occupation du sol est décomposé en deux phases :

- une **phase préliminaire**, destinée à estimer la qualité de l'imagerie Quickbird extraite de Google Earth.
- Une **phase principale**, ciblée sur l'interprétation de l'occupation du sol.

4.2.1.2.1. Phase préliminaire de qualification de l'imagerie Quickbird Google Earth

Cette étape de qualification de l'imagerie Quickbird diffusée sur Google Earth est indispensable pour la validation de l'interprétation. En effet, aucune étude publiée n'a encore estimé les écarts radiométriques et géométriques entre l'image diffusée et vendue par l'opérateur du satellite et celle proposée via le globe virtuel. Si la dégradation de l'image est suffisamment importante pour altérer l'interprétation, les deux supports ne peuvent alors plus être considérés comme équivalents.

Pour réaliser cette qualification, nous nous sommes appuyés sur une composition colorée Quickbird rehaussée à 60 cm de résolution, disponible dans notre société d'accueil et acquise dans le cadre d'un projet cartographique. Nous l'avons ensuite comparée avec son exacte réplique sur Google Earth (unique image source). Sur cette image, cinq échantillons ont été extraits, chacun à quatre niveaux de zoom différents. Ils se situent autour de la ville de Maroua, en l'Extrême Nord Cameroun (Figure 95). Ces échantillons ont été sélectionnés parce qu'ils contenaient au moins cinq classes d'objets ou surfaces identifiables distinctes. Aucune correction radiométrique ou géométrique n'a été appliquée aux échantillons prélevés, de manière à conserver ces caractéristiques.

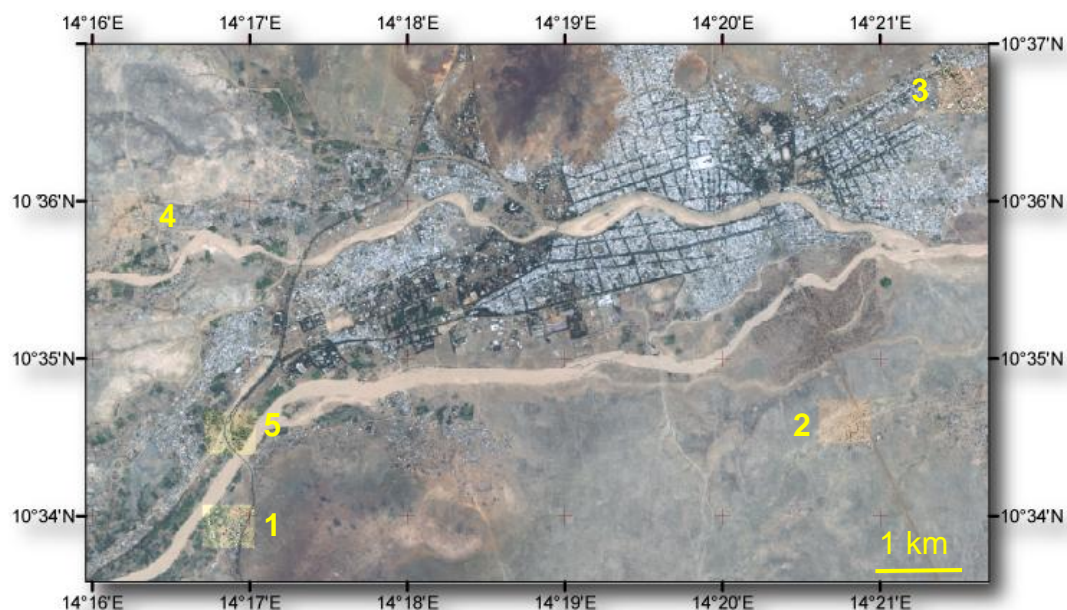


Figure 95 : Localisation des extraits Quickbirds extraits de Google Earth superposés sur l'image Quickbird source

Les 5 extraits sont localisés autour de la ville de Maroua. Les extraits 1 et 5 intègrent une route goudronnée, des cultures, la végétation et le fleuve. L'extrait 2 couvre une route entretenue non goudronnée et deux types de sols. L'extrait 3 est localisé en périphérie urbaine. Enfin l'extrait 4 couvre une zone de remblais et de sols ferrugineux. Sur ces 5 extraits, les dénivelés topographiques sont faibles (< 5m).

Le premier point de qualification concerne la radiométrie (Figure 96). Nous avons recherché à approcher la radiométrie de l'image diffusée sur le globe virtuel en appliquant une suite de réglages radiométriques simples sur l'image originelle.

Le second point cible la qualité globale de l'image dans le contexte spécifique de l'interprétation d'occupation du sol. Chaque couple d'échantillons « image originelle / image du globe virtuel » est classé, selon les types d'objets identifiés. Les diagonales des matrices de confusion de chacun des couples sont calculées et comparées. Les classifications sont réalisées pour quatre types d'algorithmes (bayésien, méthode d'apprentissage, orientée objet par logique floue et K-means).

Enfin le dernier point valide les interprétations précédentes en excluant les erreurs géométriques. En effet, la projection ellipsoïdale et la correction de relief du globe virtuel provoquent un certain nombre de distorsions géométriques mineures. Ces distorsions, de l'ordre du pixel, ne sont pas compensées par une orthorectification de l'image. La matrice de confusion compare les agrégats à une même position géographique. Une translation d'un pixel peut alors créer une erreur globale de l'ordre de 20%. Nous avons donc comparé les superficies de chaque classe interprétée.

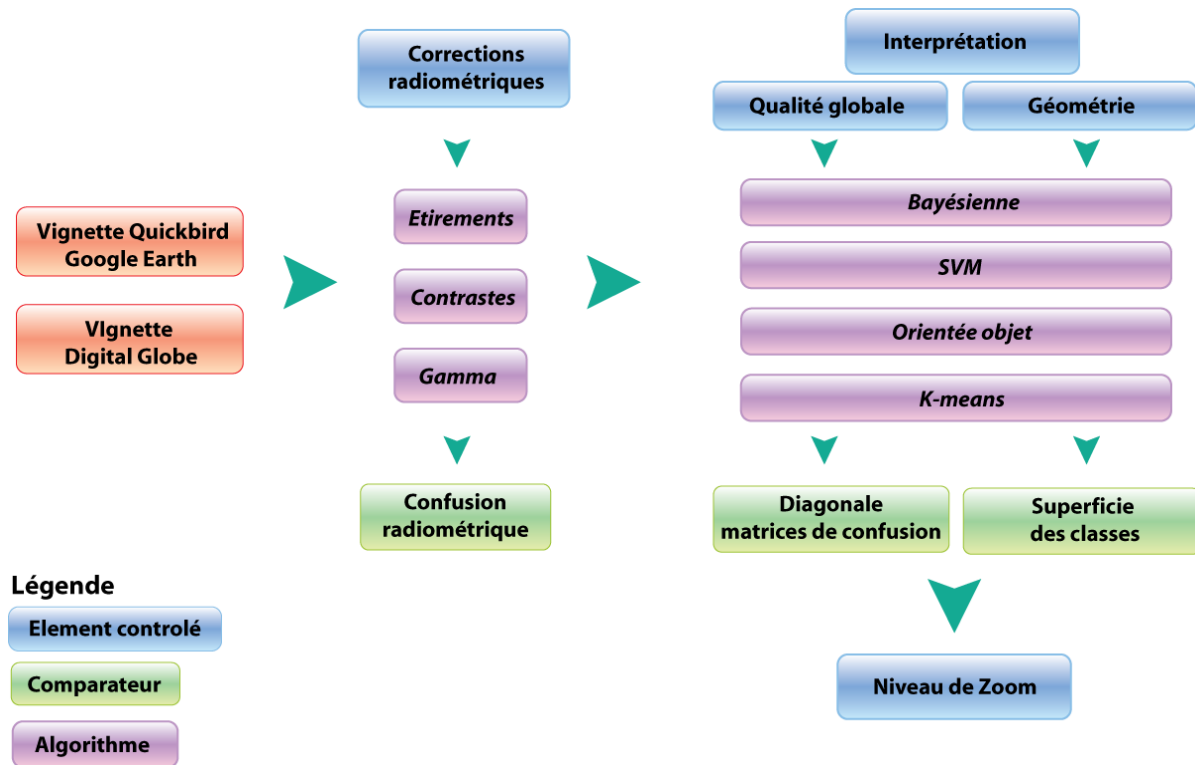


Figure 96 : Protocole de qualification de l'imagerie Quickbird issue du globe virtuel Google Earth

4.2.1.2.2. Phase principale d'interprétation d'occupation du sol

Nous avons pris l'option de faire intervenir l'expert dans l'interprétation. L'objectif de cette phase principale est donc de comparer les résultats de classification supervisée. Les résultats des analyses discriminantes basées sur les attributs de couleur, de forme et de contexte topologique sont les mieux adaptées pour ce type d'images (Xu, *et al.*, 2004; Blaschke *et al.*, 2007).

Les caractéristiques spatiales et radiométriques des compositions Quickbird diffusées ne sont cependant pas exactement similaires à celles que l'on peut réaliser à partir des données originelles. Ces différences peuvent alors provoquer un écart important d'interprétation. Afin de minimiser ce risque, nous avons inclus tous les algorithmes de classification à base pixel les plus couramment utilisés dans cette phase de test.

La première étape (Figure 97) consiste à comparer les résultats de cinq types d'analyses discriminantes : parallélipédique, distance minimale à la moyenne, angle spectral, maximum de vraisemblance SVM. Puisque ces classifications font intervenir l'expert dès la phase d'apprentissage, nous avons évalué l'influence du taux d'échantillonnage de l'image a priori sur la qualité de la classification. Le taux optimal indiqué par un résultat positif serait alors recherché. Les pixels d'apprentissage sont extraits de la photo-interprétation de l'image par un échantillonnage aléatoire stratifié proportionnel à chaque classe d'objet. La classification orientée objet n'est pas considérée dans cette étape car il n'est pas possible d'y prélever un échantillonnage aléatoire.

Le coefficient kappa (Chrisman, 1991; Friedl & Brodley, 1997) compare les résultats des analyses. Il exprime la qualité globale de la classification par la somme des erreurs de confusions par rapport à une classification aléatoire. Il est compris entre -1 et 1.

A l'issu de cette première étape, la méthode de classification ayant fourni la plus forte valeur de kappa, quelque soit le taux d'échantillonnage, est sélectionnée.

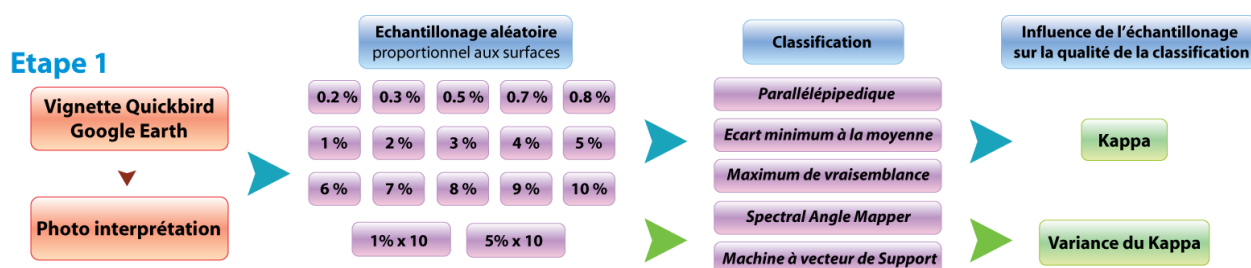


Figure 97 : Protocole d'évaluation des méthodes de classification à base pixel, selon un échantillonnage aléatoire, pour l'interprétation de l'occupation du sol

La seconde étape (Figure 98) a pour objectif d'évaluer le degré de pertinence des analyses supervisées par le biais de deux critères :

- Les **erreurs de classification**. Elles sont évaluées par un coefficient de portée sémantique que nous avons développé (cf 4.2.2.2.3). A chaque type d'objet est attribuée une valeur sémantique. Elle correspond à un indice de traficabilité. Le coefficient de portée sémantique exprime les erreurs de confusions de la classification, pondérée par cet indice sémantique appliqué à la traficabilité ;
- Les **erreurs de discrimination**. Elles sont estimées par un algorithme de sélection spécifique. Il compte le nombre d'objets répondant positivement à un ensemble de conditions spatiales. Il a pour objectif de déterminer le seuil de taille d'objet en dessous duquel ils ne sont plus reconnus par l'interprétation.

Une photo-interprétation d'expert fournit la base de référence. Nous évaluerons enfin l'efficacité d'une combinaison sélective des meilleurs résultats issus de ces deux critères. Une meilleure efficacité est définie par une augmentation du rapport du temps de traitement sur la réduction des erreurs.

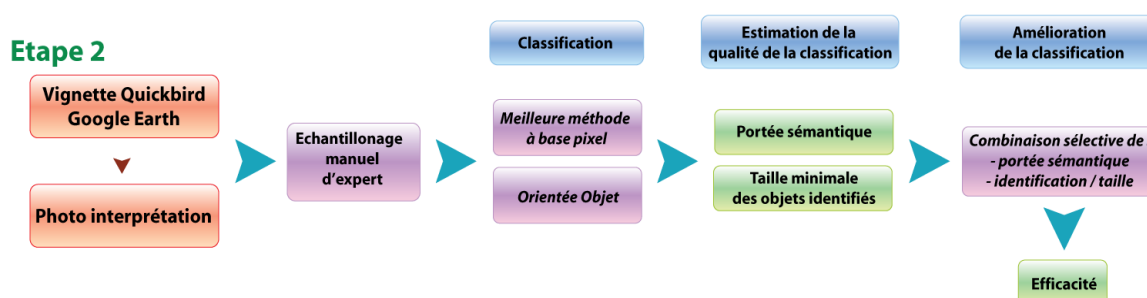


Figure 98 : Protocole de qualification de méthodes à base pixel et orientée objet selon deux critères d'estimation, et évaluation de l'efficacité de leur combinaison sélective

Enfin, ces résultats sont étendus sur une variété de paysages du Tchad méridional (Figure 99).

Etape 3



Figure 99 : Protocole de validation de la méthode évaluée par les deux étapes précédentes par son report sur sept types d'environnements du Tchad méridional

4.2.2. Résultats de l'extraction de l'occupation du sol

4.2.2.1. Qualification de l'imagerie Quickbird Google Earth

La composition colorée Quickbird de Maroua diffusée sur Google Earth est comparée à son image de référence issue de Digital Globe. Sa qualification porte sur quatre points : la radiométrie, la géométrie, la qualité d'interprétation et le niveau de zoom optimal d'extraction.

4.2.2.1.1. Corrections radiométriques

La superposition optimale des histogrammes de valeur des canaux bleu, vert et rouge entre les deux images a été obtenue par un étirement linéaire par morceaux. Cependant, le contraste des arbres reste visuellement plus marqué, sur tous les échantillons Google Earth (Figure 100). Les objets sombres (routes goudronnées, ombres) sont également plus foncés. Ces renforcements traduisent une correction de la valeur de luminance.



Figure 100 : Superposition d'un extrait d'image Google Earth sur l'image de référence, après correction d'étirement.

L'application d'un étirement des histogrammes de couleur sur l'image Quickbird suffit à obtenir une approximation de la correction radiométrique appliquée à l'imagerie Google Earth. Tous les objets y apparaissent cependant plus contrastés.

Classiquement, le rehaussement de la saturation est obtenu par une conversion de l'espace colorimétrique Rouge-Vert-Bleu vers celui de Teinte-Saturation-Valeur (Gonzalez & Woods, 2001; Jeong, *et al.*, 2003; Jensen, 2005; Konstantinidis & Andreadis, 2005). La teinte est comprise entre 0 et 360°, la saturation et la valeur entre 0 et 1

En appliquant un algorithme de corrélation d'histogramme par étirement (Morovic, *et al.*, 2002), l'image RVB résultante est cette fois-ci très proche de l'extrait Google Earth (Figure 101). La correction radiométrique par conversion d'espace colorimétrique peut être réalisée par une simple suite algorithmique, sans aucune intervention humaine. On peut donc supposer, étant donné le nombre d'image à traiter, que cette correction est réalisée automatiquement sur toutes les images reçues.



Figure 101 : Image Quickbird après conversion et rétro-conversion RVB - TSV ($S+0,1$) – RVB, à gauche, et son homologue diffusé sur Google Earth, à droite

La conversion de l'espace colorimétrique accompagné d'un rehaussement de la saturation fait correspondre parfaitement les deux images. (Taille des images : 254*382 pixels)

4.2.2.1.2. Qualité d'interprétation

La qualité de l'interprétation est évaluée par le biais d'une interprétation de l'occupation du sol sur 5 couples d'échantillons répartis autour de la ville de Maroua. Ils répondent à la condition de contenir au moins 6 éléments d'occupation du sol parmi ceux identifiés sur la zone : arbre, culture, route goudronnée, route non goudronnée, maisons à toit de tôle, sol argileux, sol sableux, fleuve. Les murets ne sont pas intégrés dans cette interprétation.

Chaque couple d'échantillon est interprété par cinq types d'algorithmes de classifications, supervisés et non supervisés. Ils permettent ainsi de caractériser le comportement de l'image face aux différentes contraintes analytiques et de segmentation. Les diagonales des matrices de confusion des interprétations issues de Google Earth sont comparées à leurs références respectives (Figure 102).

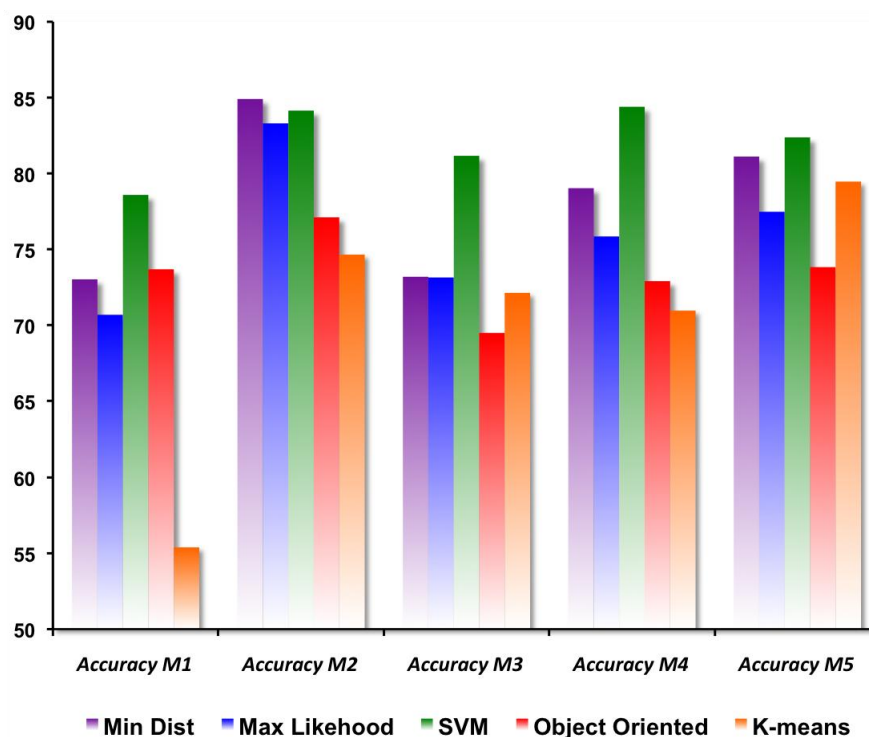


Figure 102 : Valeurs des diagonales des matrices de confusion des interprétations d'occupation du sol pour 5 extraits d'images issus de Google Earth, et pour 5 types d'algorithmes de classification.

Aucune méthode de classification ne donne de résultats supérieurs aux autres sur les 5 extraits. Les classifications par K-means donnent les écarts les plus importants. Cette méthode a cependant tendance à exagérer les différences entre les deux images.

Les diagonales des matrices de confusions expriment la précision globale de l'interprétation. Une valeur de 100% signifie une interprétation strictement identique entre les deux images. Sur les 5 échantillons étudiés, aucune ne dépasse la valeur de 85%. Cet écart important, et ce quelque soit le type d'algorithme, n'est pas strictement représentatif de la réalité. L'observation visuelle des classifications donne en effet l'impression de deux résultats identiques. Les objets sont très majoritairement reconnus, et correctement identifiés en termes sémantiques et géométriques. La superposition de ces deux interprétations montre une distortion irrégulière de l'ordre d'un ou deux pixels. Les efforts apportés sur des opérations géométriques de type translation, homothétie, transformation polynomiale d'ordre 1 et 2, et orthorectification n'ont pas permis de rectifier ce décalage.

4.2.2.1.3. Géométrie

C'est ainsi que nous avons évalué la qualité de l'interprétation en ne considérant que les superficies totales occupées par chaque classe interprétée. Ce calcul permet ainsi d'évaluer la qualité de l'interprétation sans tenir compte des distortions géométriques. Nous avons pris en considération deux techniques de classifications parmi les cinq testées précédemment : un algorithme à base pixel (SVM), et un algorithme orienté objet. Ces superficies sont mesurées sur chacun des cinq échantillons (Figure 103).

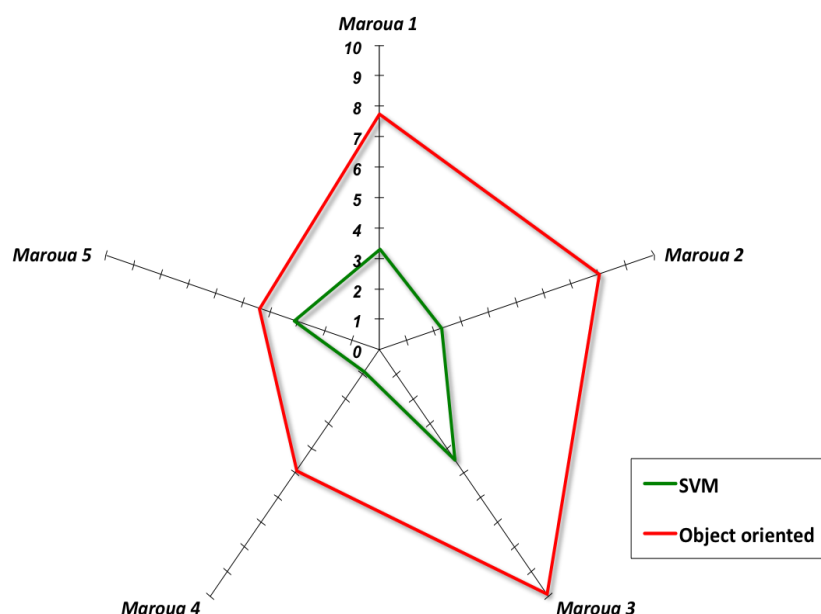


Figure 103 : Ecart types des superficies moyennes des résultats de classifications SVM et orientée objet, pour 5 échantillons

Nous avons comparé statistiquement les deux estimations par la moyenne des écarts types des superficies de chaque classe. La technique de classification orientée objet présente des valeurs cohérentes, évoluant dans un même ordre de grandeur quelque soit les échantillons (Figure 103). Elles sont cependant significativement fortes (5 à 10%) pour considérer que ces deux classifications sont dissemblables. L'algorithme de segmentation utilisé est donc sensible aux distorsions géométriques, mêmes mineures, occasionnées sur l'imagerie THR Google Earth. Par la classification SVM, les valeurs d'écart type sont très faibles (entre 1 et 4%), quelque soit le nombre de classes d'objets. La robustesse de cet algorithme le rend particulièrement adapté à ce type d'image. Ces valeurs valident la similitude entre les deux interprétations.

4.2.2.1.4. Optimisation du niveau de zoom

L'une des fonctionnalités majeures proposée par Google Earth est la possibilité d'effectuer un zoom depuis une vision globale de la Terre, jusqu'à un niveau bien supérieur à la résolution des images. Or, si cette fonctionnalité présente un aspect visuel pratique, elle n'apporte aucune aide quant à l'échelle d'observation idéale des images.

Le niveau de zoom optimal pour l'interprétation revient à extraire l'image à une résolution équivalente à l'image Quickbird originelle. Ce niveau peut être retrouvé par le calcul.

L'outil Google Earth 4 (utilisé dans cette étude) affiche une échelle en bas à gauche de la fenêtre. Elle indique une distance, qui s'ajuste dynamiquement en fonction du zoom appliqué. Seule cette valeur varie, alors que la taille de la barre d'échelle est fixe. Or, la longueur de cette barre d'échelle varie en fonction non pas de la résolution de l'écran mais de la valeur du pas de masque (ou pitch). Il représente la distance entre deux pixels. Les rapides calculs effectués sur quatre écrans de résolution, taille et pitch différents, convergent vers deux longueurs pour cette barre d'échelle, respectivement de 270 et 290 pixels, selon la technologie d'écran (Tableau 9).

Ecran	Largeur de l'échelle (mm)	Largeur de l'écran (mm)	Résolution (pixels)	Pitch (mm)	Longueur de l'échelle (pixels)
MacbookPro	62,5	332	1440*900	0,23	271
ASUS 19''	83	410	1440*900	0,2847	291
Dell portable 15,4''	75,2	331	1280*800	0,2586	291
Dell portable 17''	74,5	367	1440*900	0,2549	292

Tableau 9 : Caractéristiques des différents écrans par rapport à la longueur de la barre d'échelle de l'outil Google Earth

La composition colorée Quickbird de référence est rééchantillonnée à 60 cm de résolution. On peut supposer qu'un niveau de zoom équivalent sur Google Earth sera optimal. La barre d'échelle correspondante affiche alors 174m pour un écran PC, et 163m pour un écran Mac. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons extrait 2 images de Maroua, à ces niveaux de zoom, puis à des facteurs de 1,1, 1,2, 0,9 et 0,8 (Tableau 10). Les interprétations des échantillons extraits sont comparées à leur référence respective. Les valeurs des diagonales des matrices de confusion par classification non supervisée à 6 classes, servent de comparatif. Elles confirment l'influence du niveau de zoom sur les résultats d'interprétation.

Facteur de Zoom	Maroua 2	Maroua5
0,8	62,9	65,2
0,9	68,6	73,9
1	74,6	79,5
1,1	66,9	73,7
1,2	63,3	68,4

Tableau 10 : Valeurs des diagonales des matrices de confusion pour des échantillons d'images extraites à 5 niveaux de zoom

4.2.2.1.5. Conclusion

Les traitements radiométriques que nous avons apportés aux compositions colorées Quickbird diffusées sur Google Earth confirment qu'une correction de saturation a été appliquée aux images, par conversion de l'espace colorimétrique. Cette correction radiométrique n'a pas de conséquence sur la qualité de l'interprétation de l'occupation du sol. En revanche, les distorsions géométriques appliquées à ces images pour les besoins de leur géoréférencement, a occasionné des différences mineures sur la taille des objets reconnus. Ces différences n'interviennent pas sur la sémantique mais uniquement sur la surface de ces éléments. Enfin, l'extraction des images suggère un niveau de zoom optimal spécifique pour assurer la bonne qualité de l'interprétation. En tenant compte de ces critères, l'utilisation des compositions colorées Quickbird issues de Google Earth en tant que source d'entrée convient à l'interprétation de l'occupation du sol.

4.2.2.2. Classification spectrale et analyse sémantique

Cette seconde étape a pour objectif de réaliser une interprétation supervisée de l'occupation du sol à partir d'imagerie THR Google Earth. La qualité des classifications est estimée par le biais de deux critères spécifiques. Ils permettront de définir avec précision les limites d'identification des objets et la fiabilité de ces interprétations pour la problématique de traficabilité. Cette série de tests est menée sur une image de référence, puis reportée sur plusieurs environnements.

4.2.2.2.1. Présentation de l'image de référence

L'extrait Quickbird de référence est situé dans la région périurbaine du nord de N'Djamena (Figure 104). Il concentre sur une petite surface un grand nombre d'éléments significatifs pour la problématique de traficabilité : quatre types d'obstacles (maison à toit de tôle, barrières, arbres et arbustes, eau), route goudronnée en bon état et trois types de sols (arénosols, argiles noires tropicales et alluvions sableuses). L'ombre et une surface de rouille identifiées sur l'image, sont ajoutées à ces éléments pour éviter les erreurs de confusion spectrale. Certains objets identifiés ont été volontairement ignorés : voitures et camions se confondent avec les maisons en toit de tôles, les charganiers (hautes herbes) avec les arbres et arbustes.



Figure 104 : Prise de vue Quickbird du secteur périurbain nord de N'Djaména, extrait Google Earth
4 accessible en mars 2007

Taille de l'image : 1024*1002 pixels.

La prise de vue est datée du 21 avril 2004, c'est à dire en fin de saison sèche. En période humide, tous les fonds argileux sont inondés, et de nouvelles voies de circulation s'aménagent entre les secteurs les moins touchés. Les problèmes de traficabilité de ce secteur se gèrent à une échelle locale. Une identification correcte des types de surfaces, et des obstacles est donc requise comme point de départ du diagnostic.

La prise de vue est assez faiblement contrastée, et prend une teinte générale artificiellement rougâtre, caractéristique de la couleur des sols subarides pour cette période (rareté de la végétation et des cultures). A la période d'acquisition de l'image, toutes ces surfaces sont sèches, à l'exception d'un marigot permanent.

4.2.2.2.2. Influence de l'échantillonnage sur l'interprétation

Dans sa démarche d'interprétation, l'expert cible préférentiellement son échantillonnage sur les objets qu'il identifie avec certitude. Il inclut ainsi un biais qui favorisera ou défavorisera la classification, en fonction du nombre de régions d'entraînements et de la méthode sélectionnée.

La comparaison statistique de ces méthodes minimise ce biais par un tirage aléatoire stratifié de l'échantillonnage, proportionnel à la superficie totale de chaque classe. L'ensemble d'apprentissage est extrait de la photo-interprétation intégrale de l'image. 15 taux sont tirés, allant de 0,2 à 10% de la superficie totale de l'image. En dessous 0,2%, le nombre de pixel d'entraînement est trop faible pour les algorithmes probabilistes. Au dessus de 10%, les ensembles admettent une distribution normale qui n'entraîne plus de modification dans la classification.

Notons que les comparaisons statistiques des techniques de classification dans la littérature sont très incomplètes : un seul taux d'échantillonnage est pris en compte, et la matrice de confusion ne compare qu'une fraction de la surface analysée (Kagamata, *et al.*, 2005; Sun, *et al.*, 2005). Notre démarche se veut exhaustive. D'une part parce que l'image Quickbird analysée est transformée et nécessite de fait une caractérisation nouvelle. D'autre part le contexte de traficabilité requiert une estimation de tous les objets identifiés. La valeur exacte de la précision de la classification est fournie par une photo-interprétation intégrale de l'extrait d'image.

Le coefficient kappa (Friedl & Brodley, 1997) compare statistiquement les interprétations. Il intègre les erreurs de commissions et d'omissions de la matrice de confusion pour qualifier la précision globale de la classification. Un kappa égal à un représente une exactitude parfaite, un kappa égal à zéro un apport nul face à une classification aléatoire. Un kappa supérieur à 0,5 valide la précision de l'interprétation.

Il admet pour équation :

$$Kappa = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_i x_{+i})}{N^2 - (x_{i+} x_{+i})}$$

avec :

N est le nombre d'observations de la matrice (pixels de l'image)

r est le nombre de rangées de la matrice

x_{i+} et x_{+i} sont les totaux de la rangée i et de la colonne i respectivement

x_{ii} est le nombre d'observations dans la diagonale de la matrice

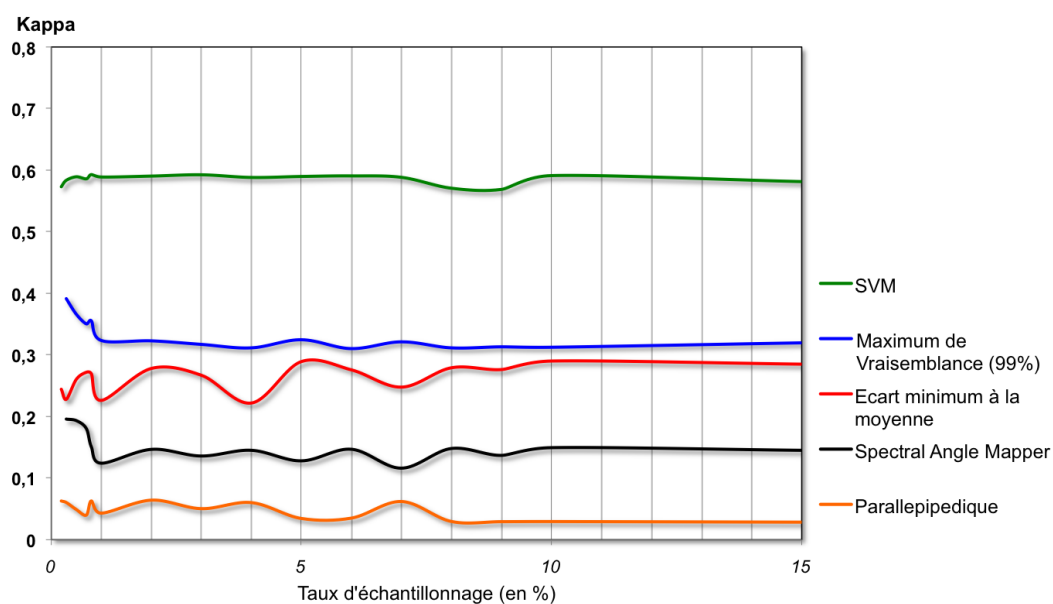


Figure 105 : Résultats des tests d'échantillonnage automatique pour 5 méthodes de classifications supervisées

Les variations de valeurs de kappa en fonction du taux d'échantillonnage pour les algorithmes de distance minimale par rapport à la moyenne et spectral angle mapper montrent une sensibilité forte de ces algorithmes par rapport aux données d'apprentissages. Le seuillage de probabilité à 99% de l'algorithme de maximum de vraisemblance réduit cette sensibilité.

Après 75 tests, la classification par SVM donne les plus fortes valeurs de kappa, quelque soit le taux d'échantillonnage (Figure 105). De plus, les classifications restent précises même avec un très faible taux d'échantillonnage. Enfin, après 10 tests aléatoires tirés pour quatre taux échantillons, la variance du kappa est quasi nulle (Figure 106). Cette insensibilité face aux ensembles d'échantillonnages confirme la robustesse de l'algorithme SVM pour l'interprétation de l'occupation du sol.

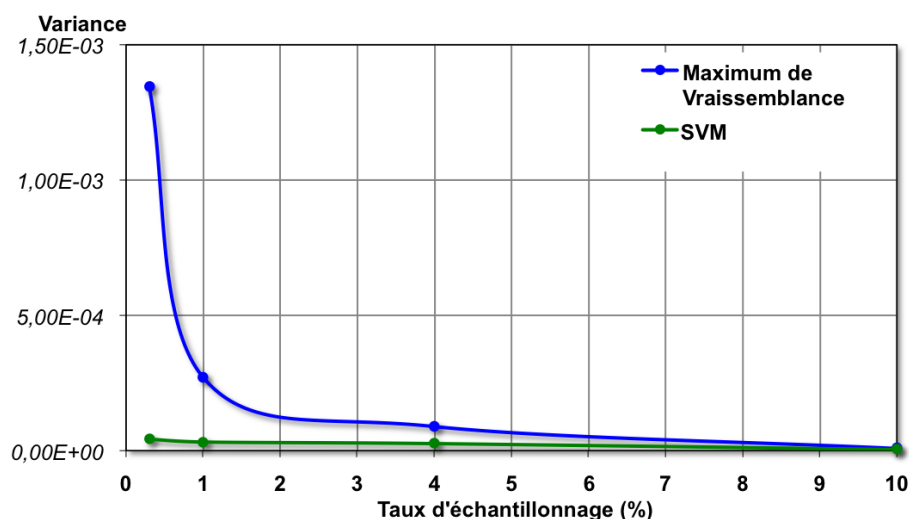


Figure 106 : Variance du coefficient Kappa après 10 tests d'apprentissage

La variance du coefficient kappa par classification par SVM est quasiment nulle et linéairement décroissante en fonction du taux d'apprentissage.

4.2.2.2.3. Qualité des classifications et coefficient d'erreur sémantique

La classification de l'occupation du sol par SVM est confrontée à une méthodologie orientée objet multi-résolution par logique floue. Une segmentation par « region growing » partitionne l'image, en optimisant le critère d'homogénéité par une pondération égale entre la forme et les caractéristiques spectrales. Le set d'entraînement est défini sur la base de cette segmentation. Il est ensuite exporté pour l'apprentissage à base pixel de la SVM. Cet ensemble d'apprentissage est donc, à l'inverse de l'étape précédente, volontairement biaisé (l'utilisateur choisi les zones d'apprentissages). Les diagonales des matrices de confusion sont présentées sous forme d'histogrammes (Figure 107).

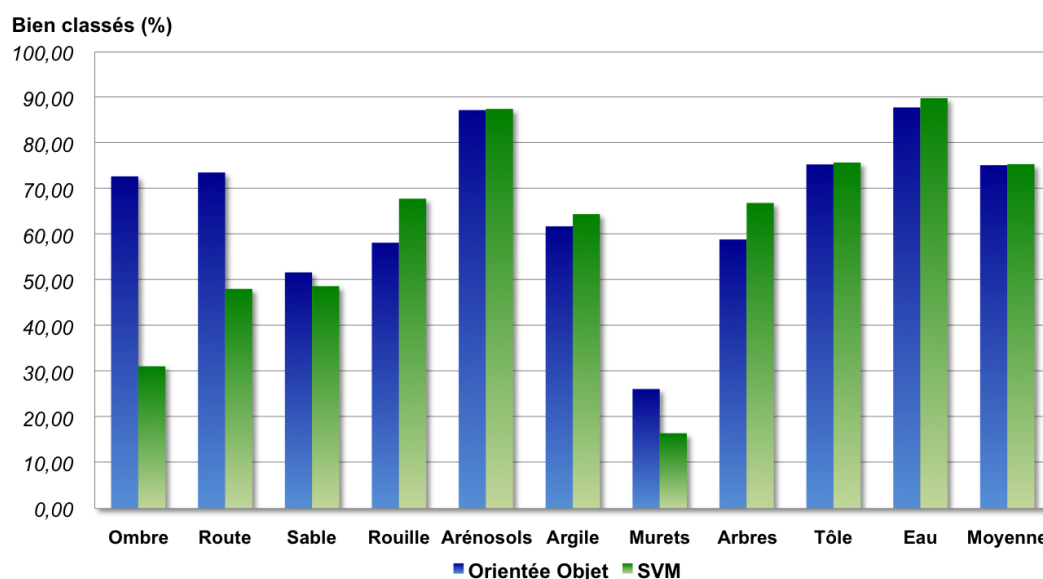


Figure 107 : Estimation de la qualité des classifications SVM et orientée objet à partir des diagonales des matrices de confusion

En considérant la moyenne des pixels correctement classés, les deux méthodes de classifications sont de qualité d'interprétation égale (583593 pixels pour le SVM contre 583024 pour l'orientée objet, soit moins de 500 pixels d'écart). Certains objets faiblement représentés sont toutefois mieux reconnus par la classification orientée objet (ombre, route, murets), à cause de leur recouvrement spectral. Or la confusion d'interprétation entre deux objets spectralement proches (argile et route) peut avoir de lourdes conséquences sur la thématique de traficabilité.

Pour évaluer ces erreurs, nous avons attribué à chaque classe d'objet une caractéristique sémantique de traficabilité représentée sous forme d'un indice numérique. Cet indice est compris entre 0 pour l'ombre et 200 pour l'eau. Les obstacles ont une valeur supérieure à 100. Une matrice de « distance » est calculée pour ce paramètre. La classification ascendante hiérarchique de cette matrice est représentée sous forme d'un dendrogramme (Figure 108).

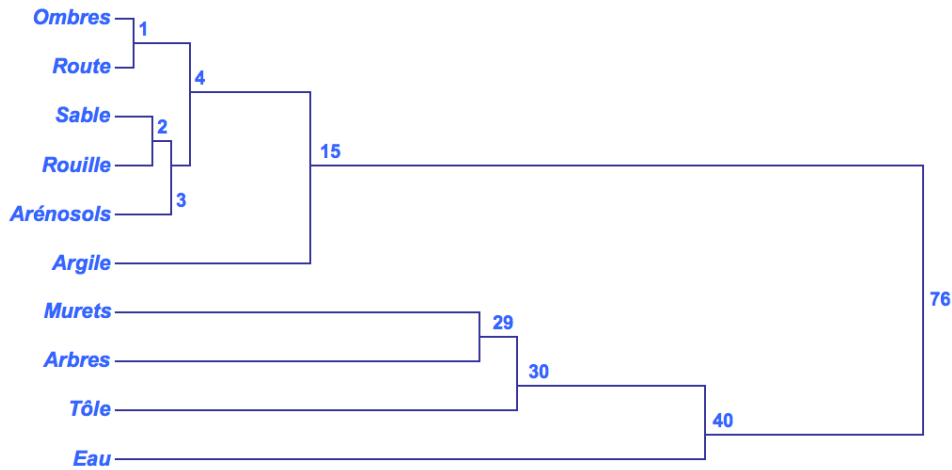


Figure 108 : Classification ascendante hiérarchique de la matrice de distance sémantique entre les classes d'objets, représentée par un dendrogramme

Les distances inférieures à 5 caractérisent les classes d'occupation du sol dont les conséquences sur la traficabilité sont identiques.

A partir de la matrice de confusion et de la matrice de distance de l'indice sémantique, nous avons construit un coefficient sémantique (Tableau 11). Ce coefficient a un comportement similaire à une fusion de caractéristiques utilisée dans la recherche d'image par contenu sémantique multicomposants (Scarloff, *et al.*, 1997), c'est-à-dire en diminuant les erreurs pour les classes les plus proches et en augmentant les plus éloignées.

	Ombre	Route	Sable	Rouille	Aréno-sol	Argile	Muret	Arbre	Tôle	Eau
Ombre	0	1	5	7	10	25	101	130	160	200
Route	1	0	4	6	9	24	100	129	159	199
Sable	5	4	0	2	5	20	96	125	155	195
Rouille	7	6	2	0	3	18	94	123	153	193
Arénosol	10	9	5	3	0	15	91	120	150	190
Argile	25	24	20	18	15	0	76	105	135	175
Muret	101	100	96	94	91	76	0	29	59	99
Arbre	130	129	125	123	120	105	29	0	30	70
Tôle	160	159	155	153	150	135	59	30	0	40
Eau	200	199	195	193	190	175	99	70	40	0

Tableau 11 : Matrice de distance de l'indice sémantique de traficabilité

Le coefficient sémantique SI de la matrice de confusion est défini par l'équation suivante :

$$SI = \sum_{i=1}^r \frac{(x_{ii} \cdot y_{ii})_{+i}}{\max(y_{.i}) \cdot x_{+i}}$$

Avec :

r nombre de colonnes de la matrice de confusion

x_{ii} nombre de pixels de la matrice de confusion à la rangée i et colonne i

y_{ii} valeur de distance dans la matrice de distance à la rangée i et colonne i

$\max(y_{.i})$ plus distance maximum de la colonne i , dans la matrice de distance

x_{+i} somme des pixels de la colonne i dans la matrice de confusion

Ce coefficient minimise les erreurs commises entre deux surfaces de sols de caractéristiques proches, ou deux types d'obstacles. A l'inverse, les erreurs d'identification entre deux éléments spectralement proches mais dont le comportement vis à vis de la traficabilité est opposé (sol sableux et tôle par exemple) sont maximisées. La valeur 0 correspond à une interprétation parfaite, 1 correspond à une erreur maximale (Figure 109).

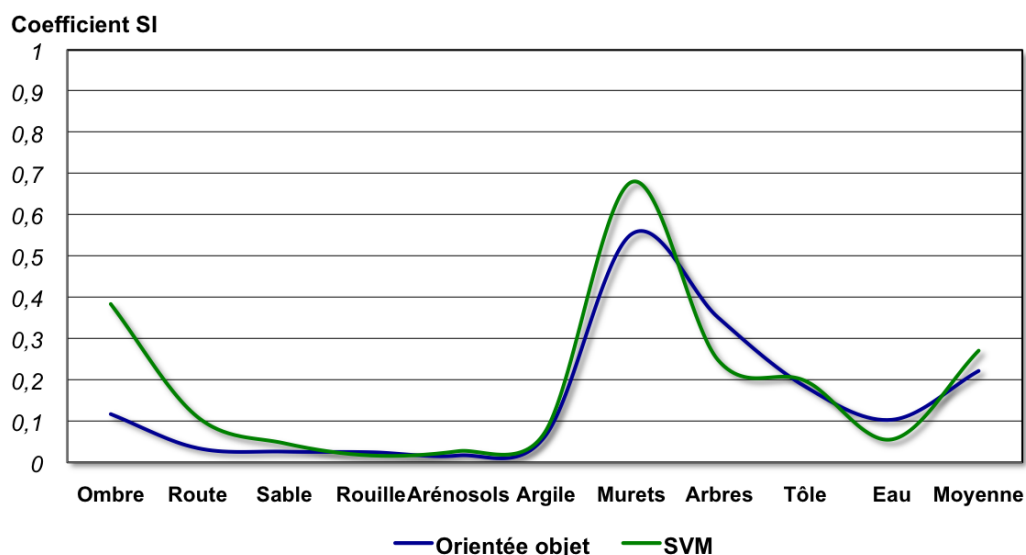


Figure 109 : Valeur du coefficient sémantique SI pour chaque classe, selon les classifications SVM et orientée objet

La méthode SVM a tendance à produire des confusions de classes plus sérieuses pour la classe route (avec les sols argileux). Les erreurs d'identification des sols sont minimisées car s'ils se confondent entre eux, ils ne s'interprètent que rarement avec un obstacle, quelque soit la classification choisie. Les murets ne sont visibles sur l'image qu'en association avec leur ombre, ce qui explique une valeur supérieure à 0,5.

En conclusion, la classification orientée objet produit moins d'erreurs contextuelles que la SVM. Ce gain est réalisé par des confusions moins « graves » pour les objets routes et ombres.

4.2.2.2.4. Seuil de reconnaissance géométrique

Un grand nombre des éléments de l'occupation du sol occupent une surface inférieure à 10 pixels de l'image Quickbird : arbustes, petites maisons, marigots. Néanmoins, ces objets ont une chance d'appartenir à une classe d'obstacle. Ils peuvent également impacter significativement sur la traficabilité par rapport à leur environnement direct.

Nous avons donc inclus dans le processus de qualification un taux de reconnaissance des objets, classé par leur dimension. Les éléments de l'occupation du sol sont définis par une somme de polygones adjacents. En satisfaisant un certain nombre de conditions topologiques, ces éléments sont sélectionnés par le biais algorithmique spécifique que nous avons élaboré (Figure 110).

Chaque objet occupe une surface équivalente à sa dimension. Le seuil supérieur est fixé à 2500 pixels (900 m²). Il correspond au plus gros objet anthropique de l'image.

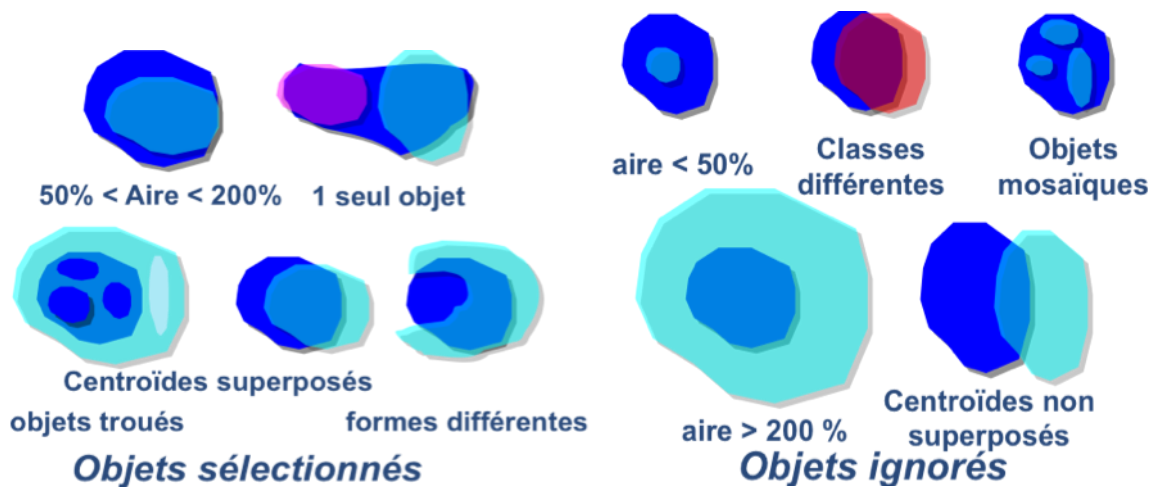


Figure 110 : Conditions de sélection de l'algorithme face à des situations topologiques rencontrées entre deux couches vecteur.

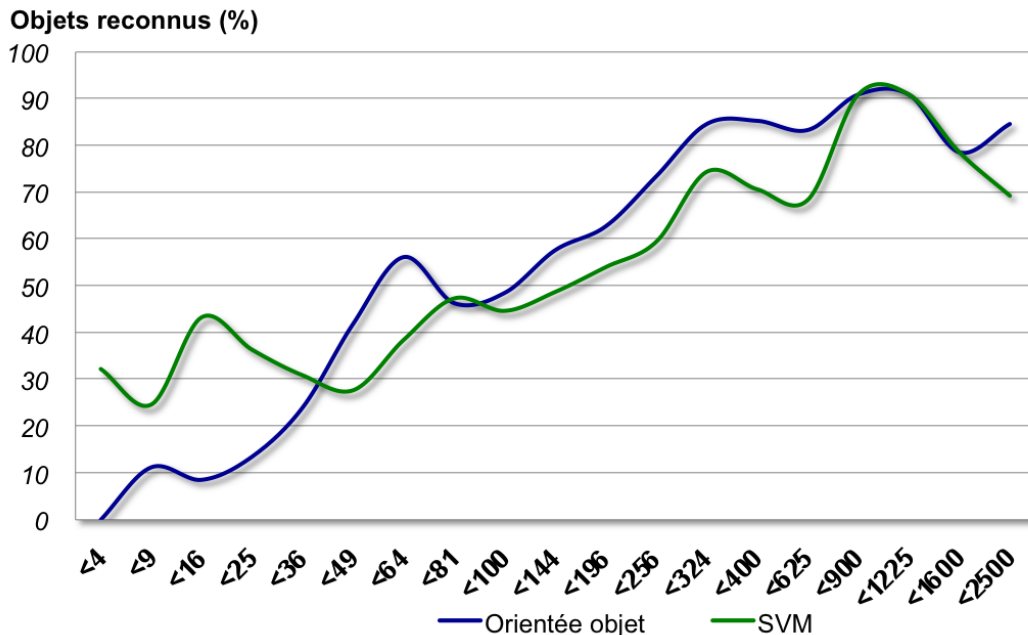


Figure 111 : Taux de reconnaissance des objets, classés par dimension, exprimé en nombre de pixels, pour les deux méthodes de classification employées

A partir de 8x8 pixels, soit 23 m², plus de la moitié des objets sont reconnus par classification orientée objets. Cette méthode reste supérieure à l'algorithme SVM à base pixel pour tous les objets supérieurs à cette dimension. En revanche, les petits éléments, inférieurs à 6x6 pixels, ne sont reconnus que par la classification SVM. Toutefois, les identifications correctes ne concernent que 30% des éléments de ces dimensions.

En hiérarchisant ces classes d'objets en deux catégories, obstacles et sols, un seuil s'établit à la dimension de 7x7 pixels (Figure 111). En dessous, les obstacles ne sont reconnus par aucune des deux méthodes de classification. En revanche, les sols atteignent un taux de 50% par la méthode à base pixel SVM. Au delà, les taux de reconnaissance augmentent progressivement. Ils dépassent 80% à partir de 324 pixels par la méthode orientée objet.

4.2.2.2.5. Optimisation des classifications par combinaison sélectives

La synthèse des critères sémantiques et seuils géométriques ne permet pas de favoriser une méthode de classification par rapport à l'autre. Chacune apporte une information originale, là où l'autre est déficiente.

La classification orientée objet a tendance à conserver la forme géométrique et à assurer une continuité des éléments de surface. En revanche, elle élimine une grande partie des petits objets. Cette perte d'information s'accompagne d'une production d'erreurs liées au processus d'attribution des segments de l'image qui ne prend en compte que des statistiques simples (moyenne, maximum, minimum de valeurs).

La classification SVM ne reconnaît les objets qu'à leur expression spectrale. L'impression d'ensemble revient à une mosaïque de points. En revanche les erreurs sont commises sur de plus petites surfaces, et les objets, mêmes extrêmement petits, ont une chance d'être reconnus. De plus, l'algorithme est très peu exigeant pour l'échantillonnage, et accepte des taux très inférieurs à la classification orientée objet.

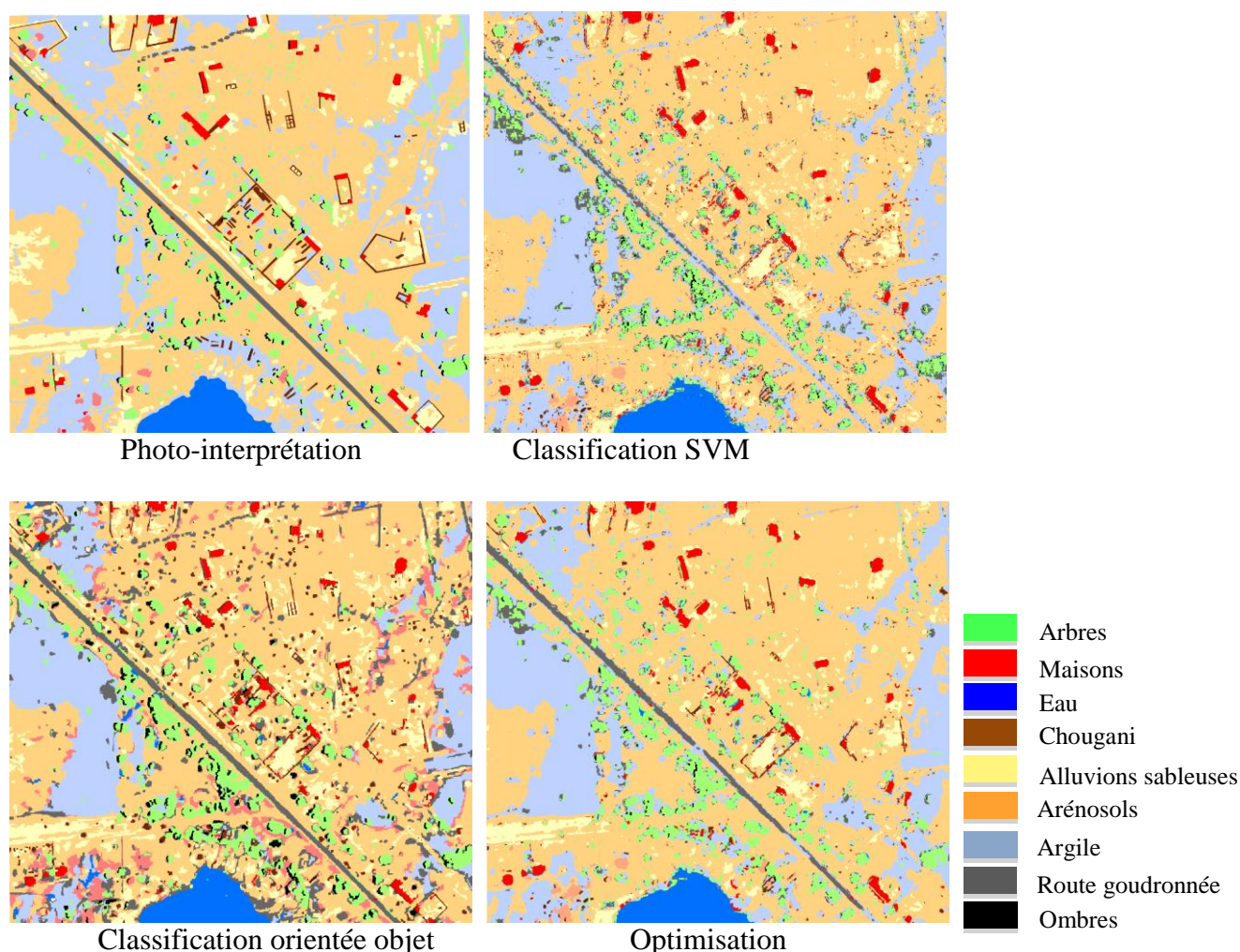


Figure 112 : Résultat des quatre interprétations d'occupation du sol réalisées sur l'extrait d'image Quickbird issue de Google Earth : photo-interprétation, classifications SVM et orientée objet et optimisation

Une combinaison sélective des classes les mieux reconnues par le biais de critères sémantiques et géométriques permet d'obtenir une interprétation optimisée. La qualité du produit final, estimée par la diagonale des matrices de confusion, n'est cependant améliorée que de 5% (soit environ 15000 pixels) par rapport au rendu d'une seule méthode, pour un temps de calcul double. Cette perte d'efficacité est cependant compensée par des erreurs d'identification réduites pour toutes les classes, et la préservation de la continuité d'interprétation des objets (Figure 112). Le mosaïquage des objets est également considérablement réduit.

4.2.2.3. Synthèse et portée de l'analyse

Ce protocole d'interprétation a été reporté sur six autres secteurs représentatifs de la variété de paysages du Tchad méridional (Figure 113). Chacun de ces extraits contient entre 7 et 9 classes d'objets, dont au moins deux types de sols. Les conclusions de ces classifications sont identiques à celles obtenues sur le secteur périurbain de N'Djaména. Les obstacles anthropiques sont généralement mieux identifiés par la classification orientée objet, aux dépens des erreurs de classification sur les surfaces. Les cases à toit de pailles ne sont reconnues par aucune des deux méthodes de classification.

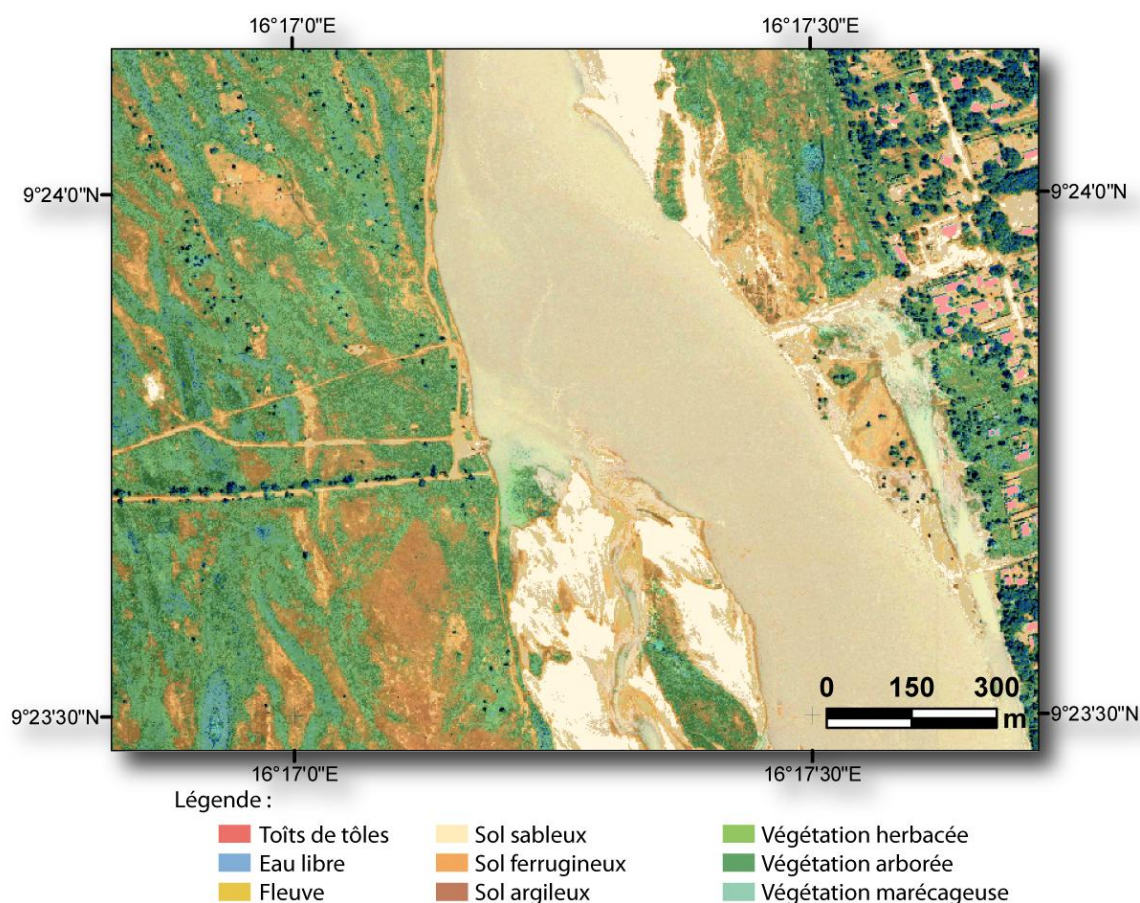


Figure 113 : Interprétation de la zone ouest de Lai par combinaison sélective des méthodes SVM et Orientée objet

La turbidité du Logone est telle qu'elle occasionne une confusion spectrale importante avec les fluvisols (en beige) et avec les étangs (en bleu). En revanche, ces étangs stagnants sont partiellement recouverts d'une végétation aquatique, qui provoque une confusion avec les autres types de végétaux (mixage à l'échelle du subpixel). Trois classes de végétation sont donc indispensables pour caractériser cette surface pourtant peu étendue (végétation aquatique, arbres et herbes). (Taille de l'image traitée : 5000*5000 pixels)

Le gain de qualité d'interprétation apporté par la combinaison sélective issue de la double classification sur ces différents secteurs ne se justifie pas. En effet, la moyenne de l'amélioration de pixels bien classés est de 4,32%, ce qui est très peu par rapport au temps de calcul généré. L'efficacité de l'analyse est donc maximale en ne prenant en compte qu'une seule des deux méthodes de classification, et orienterait l'interprétation dans ce sens. La précision des techniques SVM et Orientée objet étant comparable, le choix de l'une ou l'autre de ces méthodes aura les mêmes conséquences pour l'interprétation globale de l'image (davantage de confusion sémantique pour la SVM, mais une meilleure reconnaissance des petits objets). Dans la littérature, l'avantage est très généralement donné à la classification orientée objet, aux dépens des classifications à base pixel (Van de Voorde, *et al.*, 2003; Matinfar, *et al.*, 2007). Ces résultats doivent cependant être pris avec recul. D'une part, parce que toutes les méthodes à base pixel ne sont pas intégrées, l'algorithme d'apprentissage par SVM est très souvent ignoré. D'autre part parce que la problématique de ces études vise l'exacte identification d'un type d'objet particulier, généralement des infrastructures anthropiques de type habitations.

4.3. Cartographie de l'humidité du sol et des pistes par imagerie radar Très Haute Résolution en bande X

La restitution de l'humidité par imagerie radar bénéficie de plus de 25 ans de travaux. Elle a été étudiée sur des dizaines de capteurs, dans toutes les gammes de fréquences radar, et sur à peu près toutes les plate-formes (satellite, avion, hélicoptère). Cependant, la compréhension des interactions entre le signal radar et les paramètres physiques de surface est toujours en phase expérimentale (Wagner & Pathe, 2004). Les relations entre l'intensité de ce signal et l'humidité sont encore exprimées par des résultats empiriques ou semi-empiriques, et rares sont les méthodes opérationnelles capables de fournir une estimation fiable de l'humidité à partir du coefficient de rétrodiffusion de l'onde radar (Le Hégarat-Masclé *et al.*, 2002).

Les imageurs Très Haute Résolution en bande X TerraSAR-X et Cosmo-Skymed permettent d'accéder à un nouvel état de connaissance de ces interactions en associant une résolution jusque là réservée aux capteurs aéroportés (métrique) et une répétitivité spécifique aux capteurs orbitaux (moins de 24h pour la constellation Cosmo-Skymed). Les caractéristiques de ces capteurs sont présentées en annexe 2.

La démarche que nous avons mise en œuvre dans ce travail consiste à explorer le potentiel d'estimation d'humidité des sols par différentes configurations de ces capteurs, tout en privilégiant leur capacité THR. Ces tests sont menés sur trois zones rurales du Tchad méridional, pour différentes conditions d'humidité (saison sèche et humide). Les paysages étudiés sur ces images sont essentiellement naturels, et caractéristiques des régions subtropicales. Un second objectif concerne la détection et la reconnaissance de la praticabilité des pistes.

Cette partie introduit les caractéristiques des capteurs et de la bande X pour l'estimation de l'humidité des sols et des pistes, ainsi que les travaux les plus pertinents adaptés à notre problématique pour cette bande de fréquence. Nos résultats de l'observation du comportement du signal en fonction de l'humidité des pistes et des sols concluent cette étude.

4.3.1. Apport des capteurs d'imagerie radar THR en bande X

4.3.1.1. Caractéristiques des imageurs SAR en bande X

TerraSAR-X et Cosmo-Skymed sont des imageurs radar orbitaux. Ils appartiennent à une nouvelle génération de capteurs radar qualifiée de Très Haute Résolution car ils atteignent une résolution au sol de l'ordre du mètre.

4.3.1.1.1. Principe du traitement SAR

Les capteurs d'imagerie radar (RADio Detection and Ranging) sont des systèmes actifs. Ils illuminent une surface en émettant leur propre impulsion électromagnétique, puis mesurent sa rétrodiffusion (Figure 114). Ce signal polarisé est transmis par une antenne, montée sur une plate-forme, dans la gamme de fréquences des micro-ondes (1 à 100 GHz). La surface terrestre diffuse cette énergie dans toutes les directions (Wong, 1996). L'antenne enregistre alors une fraction du retour de ce signal, ou rétrodiffusion.

Tous les imageurs radar actuels fonctionnent sur le principe du traitement par synthèse d'ouverture (ou « Synthetic Aperture Radar », SAR). Il consiste à compresser le signal en distance (compression d'impulsion par une modulation de fréquence linéaire (Moreira, *et al.*, 1996), ou chirp) puis en azimut (synthèse d'ouverture, qui intègre le décalage de fréquence lié à l'effet Doppler).

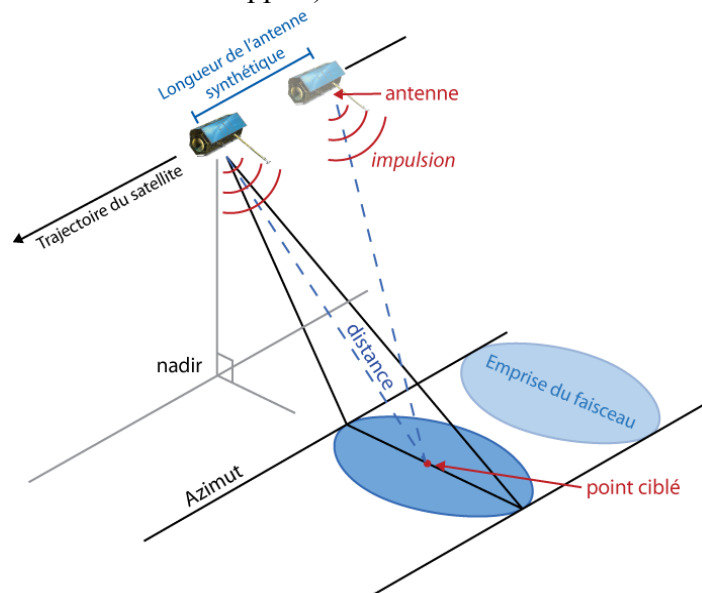


Figure 114 : Principe de fonctionnement d'un capteur radar SAR

L'antenne se déplace parallèlement à la zone à imager, et envoie un faisceau d'impulsions sur une visée latérale. La largeur de ce faisceau est suffisamment grande dans la direction azimutale pour qu'un point de la surface soit illuminé plusieurs fois (Oliver & Quegan, 1998). Le déplacement du capteur par rapport à un point fixe de la surface produit un décalage de fréquence entre le signal émis et reçu (effet Doppler). La phase du signal reçue varie donc avec la distance entre la plate-forme et la cible, à mesure que l'antenne se déplace. Le traitement de la synthèse d'ouverture combine les variations d'amplitude et de phase des signaux de rétrodiffusion des nombreuses impulsions illuminant une cible particulière. Cela a pour effet de générer une antenne virtuelle, ou antenne synthétique, de très grande résolution (Henderson & Lewis, 1998). L'image est reconstituée par une combinaison cohérente de ces signaux par transformée de Fourier inverse.

4.3.1.1.2. Spécificité des capteurs spatiaux en bande X, TerraSAR-X et Cosmo-Skymed

Jusqu'en 2007, l'imagerie haute résolution en bande X était réservée au domaine militaire et aux capteurs aéroportés. En opérant dans cette bande de fréquence, Cosmo-Skymed et TerraSAR-X atteignent une résolution à peu près dix fois supérieure à la génération de capteurs précédents (ERS, ENVISAT, RADARSAT). Elle est de 1,2m sur TerraSAR-X (Fritz & Eineder, 2009) et 1,6m en utilisation civile sur Cosmo-skymed (ASI, 2007). L'évolution des phénomènes de surface peut ainsi être étudiée à une échelle d'observation comparable à celle des radars aéroportés, mais également avec une souplesse des configurations d'acquisitions (incidence, polarisation, résolution), modulables en vol, spécifiques aux capteurs satellitaires (Figure 115).

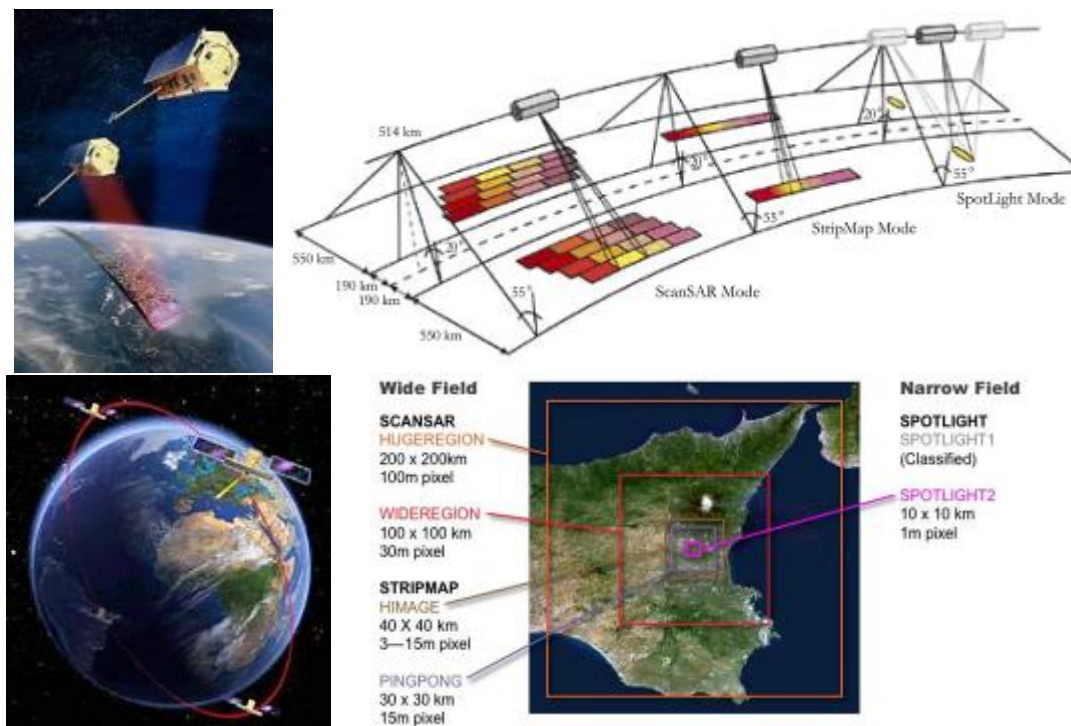


Figure 115 : Modes d'acquisition et caractéristiques orbitales des images issues des capteurs TerraSAR-X (en haut) et Cosmo-Skymed (en bas)

TerraSAR-X et Cosmo-Skymed appartiennent chacun à des constellations de satellites, visant des perspectives opérationnelles complémentaires. Fin 2009, TerraSAR-X sera jumelé avec TanDEM-X. Les objectifs de cette mission sont orientés vers la génération systématique de MNT à une précision altimétrique inférieure au mètre et planimétrique de l'ordre de 12m (Krieger, *et al.*, 2005). Cosmo-Skymed est une constellation militaro-civile de 4 satellites se suivant sur une même orbite. Ils peuvent ainsi atteindre une revisite d'environ 2h. Les applications de ce système sont dédiées à la surveillance et à l'observation de risques liés à l'environnement (inondations, feux de forêts, glissements de terrain...). Ils composent la branche radar de la constellation Orfeo (dont les satellites Pléiades constituent la branche optique).

Les caractéristiques techniques de ces deux capteurs sont très proches : fréquence d'émission (9-9,6 GHz) et d'impulsion (135 à 150 MHz), trois modes de prise de vue (Spotlight, Stripmap et ScanSAR), double polarisation (VV-HH, HH-HV et VH-VV), angle d'incidence modulable entre 28° et 55°. Nous avons observé que pour une même configuration, ces deux capteurs apportent également une information radiométrique identique après calibration. Lorsque ce cas de figure se présentait sur une même zone, nous avons utilisé ces capteurs en parallèle.

4.3.1.2. Influence des paramètres instrumentaux et du milieu sur l'image THR en bande X

Le traitement du signal radar aboutit à une image codée en phase et en amplitude. Elle résulte des interactions entre des paramètres instrumentaux (longueur d'onde, polarisation et angle d'incidence), et les paramètres physiques de la surface (rugosité, humidité, texture et types de sol, végétation,...).

4.3.1.2.1. Paramètres instrumentaux

Longueur d'onde

En théorie, la sensibilité du signal radar aux paramètres de surface est plus importante en utilisant des ondes de fréquences L (Ulaby, *et al.*, 1978). En pratique, la bande X sature rapidement face à un sol trop rugueux ou trop humide (Blumberg, 2007). Mais on peut toutefois fortement diminuer cette saturation en faisant varier l'angle d'incidence et la polarisation du signal. L'image ainsi obtenue est ainsi plus contrastée.

La bande X correspond à une gamme de fréquence comprise entre 8 et 12,5 GHz (Figure 116). A résolution égale, elle requiert moins d'énergie que les autres gammes utilisées en imagerie radar, C, P et L, ce qui permet de raccourcir la durée de l'impulsion émise et d'augmenter la résolution. En contrepartie, l'onde de bande X ne pénètre que très peu dans le sol, au maximum de quelques centimètres (Ulaby, *et al.*, 1982; Polidori, 1997). L'interaction du signal avec les propriétés physiques du sol n'est alors plus fonction que de deux paramètres : la constante diélectrique liée à l'humidité du sol et la rugosité de surface (Henderson & Lewis, 1998; Holah, 2005; Baghdadi, *et al.*, 2008).

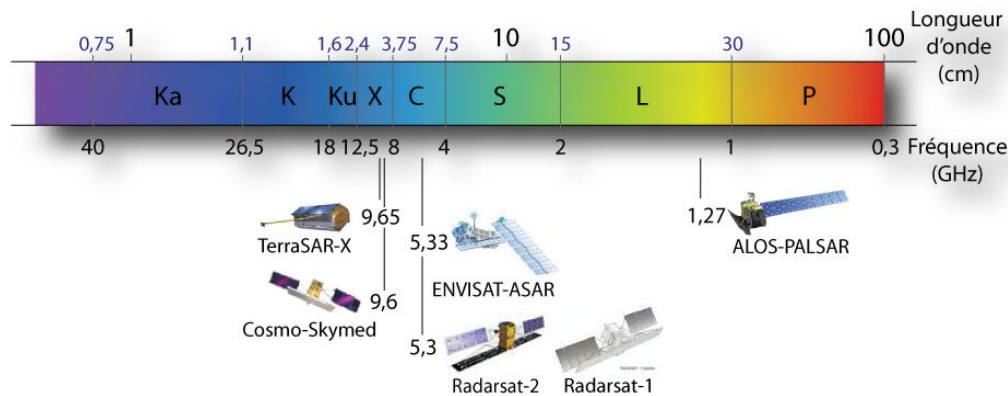


Figure 116 : Bandes de fréquences micro-ondes utilisées par l'imagerie radar satellitaire

Les ondes de basse fréquence (<2 GHz) acquièrent la capacité de pénétrer la couche supérieure du sol ou la canopée. On obtient ainsi un accès direct aux propriétés d'humidité du sol lorsqu'il est recouvert par la végétation, (Troch, *et al.*, 1997; de Roo, *et al.*, 1998; Moghaddam, *et al.*, 2000) ou à une information de sub-surface, dans le cas de sols nus secs (Elachi, *et al.*, 1984; Schaber, *et al.*, 1986; 1997; Grandjean, *et al.*, 2001). La bande P est utilisée pour l'observation du sol martien.

Angle d'incidence

L'angle d'incidence est l'angle entre le faisceau du radar et la normale. Il influence la manière dont sera réfléchi le signal radar. Sur les bandes courtes, C et X, la rétrodiffusion du signal décroît avec l'augmentation de l'angle d'incidence, pour toutes les conditions d'humidité (Lang, *et al.*, 2006).

Polarisation

La polarisation est une propriété de l'onde électromagnétique qui décrit l'orientation de son champ électrique, dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation. L'onde émise par un imageur radar est polarisée dans une direction horizontale (H), ou verticale (V). L'énergie rétrodiffusée est également enregistrée dans l'un de ces deux plans.

En conséquence de son interaction avec le sol, la polarité de l'onde rétrodiffusée peut être différente de celle de l'onde émise (Pottier & Lee, 2009). Les mécanismes de diffusion de surface, liés aux paramètres de rugosité et d'humidité, conservent en grande partie la polarité du signal, vertical ou horizontal (Figure 117). En revanche, la diffusion volumique, qui intervient lorsque l'onde pénètre dans un milieu composé de différentes couches (glace, sol ou feuilles), dépolairise l'onde (Henderson & Lewis, 1998).

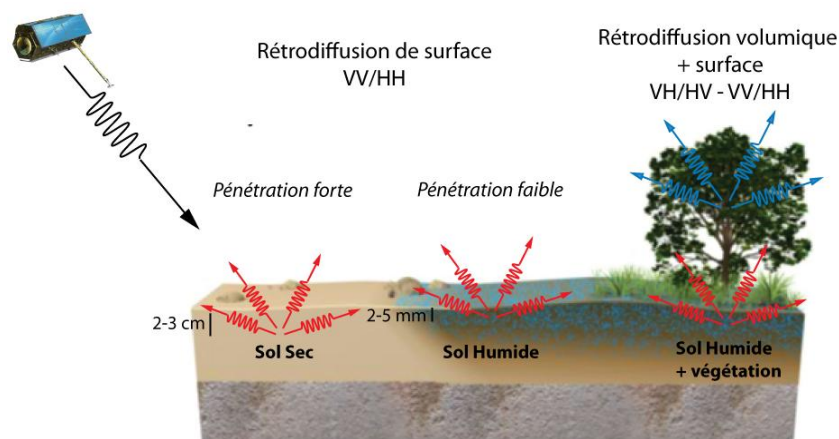


Figure 117 : Mécanismes de rétrodiffusion et profondeur de pénétration de l'onde radar X dans le sol

Dans un sol sec, l'onde radar pénètre de quelques centimètres dans le sol. Le retour de signal vers le capteur est faible, car l'énergie est diffusée dans toutes les directions (rétrodiffusion de surface). Lorsque le sol s'humidifie, l'onde se réfléchit sur les particules d'eau. Une plus grande fraction du signal incident retourne vers le capteur. Lorsque le signal rencontre la végétation, il se diffuse sur les feuilles qui renvoient plusieurs fractions du signal émis vers le capteur (rétrodiffusion volumique). Il s'additionne à la diffusion de surface du sol.

4.3.1.2.2. Paramètres de surface

Rugosité

La rugosité de surface du sol influe fortement sur la quantité d'énergie renvoyée vers le radar. Plus la rugosité d'une surface est forte, plus l'intensité du signal renvoyé vers le capteur est importante. Les surfaces apparaissent alors plus claires sur l'image (Ulaby, *et al.*, 1986).

Selon la rugosité de la surface, on distingue trois mécanismes de diffusion (Figure 118) :

- une **réflexion spéculaire** lorsque le signal interagit avec une surface parfaitement lisse (eau libre, toit d'une bâtisse). L'intensité du signal est alors celle du bruit ;
- Une **réflexion diffuse** lorsque le signal interagit avec une surface rugueuse (sols nus) ;
- Une **réflexion multiple** lorsque le signal est réfléchi entre plusieurs surfaces (murs, ponts, arbres, rochers). Une fraction importante du signal est renvoyée vers le capteur.

Les études expérimentales du comportement du signal menées par Holah (2005) et Baghdadi *et al.* (2008) à partir de capteurs THR aéroportés en bande X ont montré une indépendance du signal par rapport à la rugosité de ces sols. Cependant, ces analyses ne portaient que sur une parcelle agricole (de composition pédologique connue), et sous des conditions d'humidité moyenne de climat tempéré (région du Sud de la France).

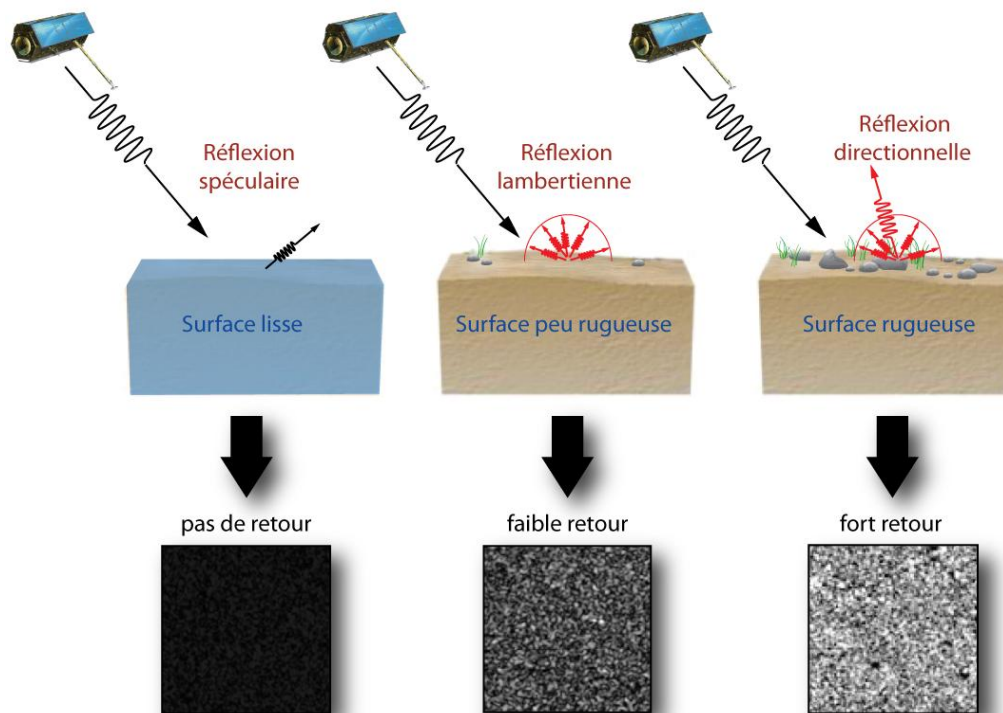


Figure 118 : Comportement du signal radar en fonction de la rugosité de surface
 Selon le critère de Rayleigh, une surface est dite rugueuse si l'écart type des hauteurs (variation verticale de la rugosité du sol) est supérieur à $\frac{\lambda}{8 \cos \theta}$. Les capteurs TerraSAR-X et Cosmo-Skymed opèrent dans une longueur d'onde d'environ 3 cm. Le seuil minimal de rugosité évolue donc entre 3,5 et 6 mm, selon l'angle d'incidence.

Humidité

L'estimation de l'humidité du sol repose sur la capacité de pénétration de l'onde radar dans le sol. La profondeur de cette pénétration est fonction de la constante diélectrique du sol et de la longueur d'onde (Ulaby, *et al.*, 1978; Henderson & Lewis, 1998).

Les nombreuses études théoriques et expérimentales conduites sur la recherche de la meilleure sensibilité du coefficient de rétrodiffusion par rapport à l'humidité des sols n'ont pas permis de définir une configuration optimale (Ulaby, *et al.*, 1982; Le Toan, 1982; Dobson & Ulaby, 1986; Bruckler, *et al.*, 1988; Oh, *et al.*, 1992; Fung & Chen, 1992; Le Hégarat-Masclé, *et al.*, 2002; Zribi & Dechambre, 2002). Cependant, les auteurs s'accordent sur les quatre tendances suivantes, observées quelque soit la longueur d'onde du signal émis :

- L'intensité du signal augmente avec l'humidité. Lorsque le sol arrive à saturation, il se comporte comme une surface spéculaire (Ulaby, *et al.*, 1978) ;
- La variation d'humidité des sols est indépendante des échos dépolarisés, HV et VH (Autret, *et al.*, 1989) ;
- La profondeur de pénétration de l'onde radar diminue avec l'augmentation de l'humidité (Bruckler, *et al.*, 1988) ;
- le signal radar sature pour une humidité supérieure à 35% (Dobson & Ulaby, 1986; Bruckler, *et al.*, 1988; Chanzy, 1993; Geng, *et al.*, 1996) ;
- la variation d'humidité des sols est indépendante de l'angle d'incidence du signal (Oh, *et al.*, 1992; Zribi & Dechambre, 2002; Srivastava, *et al.*, 2003; Holah, 2005).

Pour notre étude, nous estimerons l'humidité du sol à partir de la méthode de conversion du coefficient de rétrodiffusion σ^0 en humidité volumique W_s développée par Le Hégarat-Masclé *et al.* (2002). Ces résultats expérimentaux n'ont cependant été établis qu'à partir d'un signal en bande C. La bande X n'a pour l'instant pas fait l'objet de travaux quantitatifs de ce type. Les résultats que nous présentons sont donc en conséquence légèrement surestimés par rapport à leur valeur réelle. Enfin, il n'a pas été possible de calibrer le capteur radar utilisé par des mesures de terrain, ce qui aurait permis de rectifier les conversions. Cette méthode présente toutefois deux avantages majeurs pour notre problématique :

- C'est une méthode opérationnelle, construite à partir de relevés de terrain répartis sur un cycle de deux ans, et plusieurs types de bassins versants ;
- Elle permet de retrouver la valeur quantitative d'humidité d'un pixel à partir du seul signal d'amplitude radar. Pour les surfaces de sol nu, on peut ainsi obtenir un ordre de grandeur utilisable pour produire une carte d'humidité. La relation entre ces deux entités est supposée linéaire et a été confirmée par simulation du coefficient de rétrodiffusion par le modèle Integral Equation Model (Fung, *et al.*, 1992), pour des valeurs d'humidité comprises entre 8 et 35%. Par conséquent, la méthode est limitée à des valeurs de signal comprises entre -18 et -5 dB. Cette relation s'écrit :

$$W_s (\%) = 2,7 \sigma^0 (dB) + 49$$

L'émission d'un signal à forte fréquence en bande X permet d'améliorer significativement la résolution de l'image par rapport à une fréquence plus faible. En revanche, le coefficient de rétrodiffusion sature rapidement pour certaines conditions d'état du sol (forte rugosité et humidité, couverture végétale). Il est toutefois possible d'atténuer cette saturation en faisant varier les configurations du capteur en incidence et en polarisation.

4.3.1.3. Acquisition des images

Les images TerraSAR-X sont localisées sur cinq secteurs du Tchad méridional (Figure 119). Le potentiel de restitution de l'humidité des sols a été testé à partir des paramètres d'acquisitions suivants :

- deux acquisitions en mode **Spotlight simple polarisation**, pour la détection et la qualification de l'état de tous les types de pistes du Tchad méridional ; saisonnière ou non. Ce mode permet d'accéder à la plus haute résolution capteur (Figure 120) et rend l'observation des routes possibles. Elles sont centrées sur les régions d'Abéché et de Laï ;
- des acquisitions **co-polarisées HH-VV**, pour tester la sensibilité de l'humidité des sols. Ces acquisitions ont été programmées en mode Stripmap sur le capteur TerraSAR-X. Les images couvrent ainsi une étendue de 450 km², à des résolutions de 3,3m et 6,6m respectivement en simples et doubles polarisations. Ils permettent l'étude d'un éventail représentatif de paysages et de textures pédologiques. Ces acquisitions sont ciblées sur le Salamat et sur Adré.
- Une acquisition de **fin de saison sèche** (mars) et de **fin de saison humide** (septembre), pour quantifier l'évolution de l'humidité entre ces deux périodes sur la zone d'Adré. Pour réduire les variations de signal liées aux paramètres capteurs, la détection de changement n'est réalisée que pour une même polarisation, incidence, et capteur

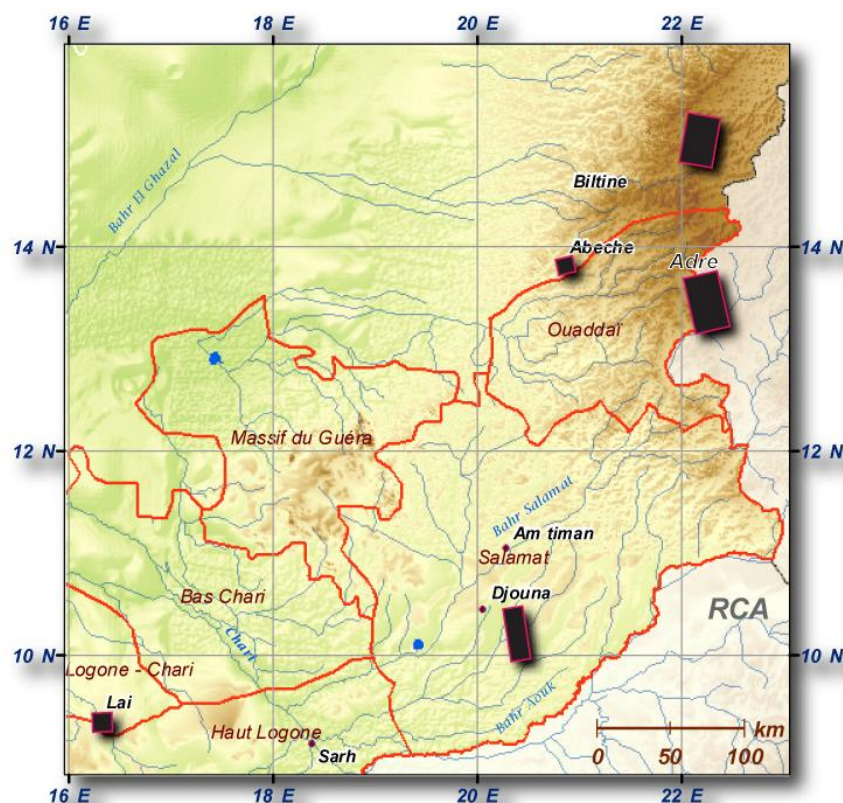


Figure 119 : Localisation des images radar programmées

Les images acquises en mode Spotlight simple polarisation sur Lai et Abéché couvrent une surface beaucoup plus petite que celles acquises en mode stripmap simple polarisation, sur Adré et Touloum (la plus au nord). L'image double polarisation de Salamat a une superficie environ deux fois inférieure aux images simple polarisation. Les images de saison sèche et de saison humide sur Adré sont superposées.

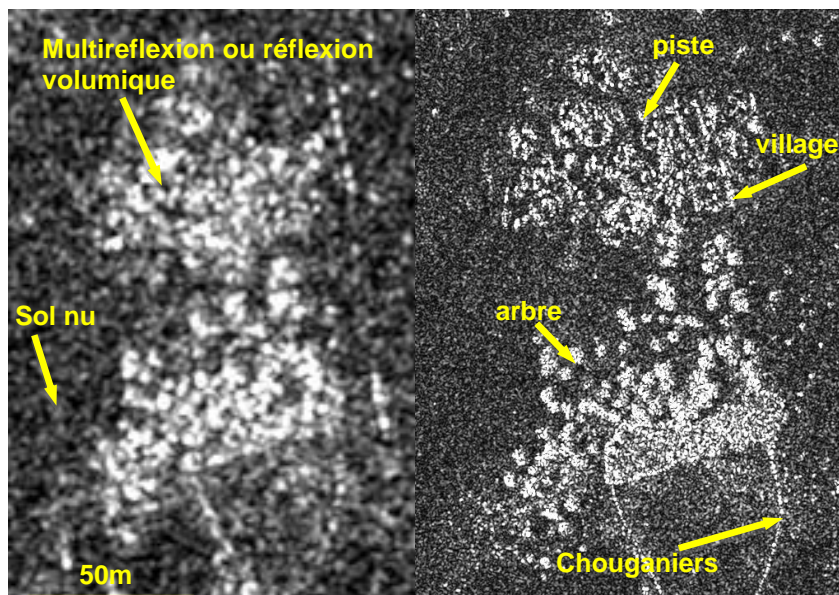


Figure 120 : Résolution de l'image d'amplitude selon le mode d'acquisition du capteur TerraSAR-X

En mode Stripmap (3,3m de résolution capteur), on peut distinguer les zones de fortes et de faibles intensités de signal mais pas identifier leur origine. Le mode Spotlight (1,2m de résolution capteur) permet un niveau complémentaire de distinction (pistes à l'intérieur du village), ainsi que l'identification des régions de radiométrie différentes par reconnaissance géométrique (arbres, villages, barrières). (Taille des images : à gauche, 120*210 pixels, à droite, 330*578 pixels)

Toutes ces images ont été produites au plus haut de degré de prétraitement géométrique (soit EEC, Enhanced Ellipsoïd Corrected, sur TerraSAR-X, équivalent au GTC, Geocoded Terrain Corrected, pour Cosmo-Skymed). Sur ces images, le signal a reçu un traitement SAR, mise en conformité sur l'ellipsoïde WGS84 et corrigé des effets de géométrie du relief par une orthorectification. Ce niveau de correction représente le meilleur compromis entre une exploitation scientifique du signal d'amplitude et une utilisation opérationnelle. Les caractéristiques principales des images radar utilisées pour l'étude sont présentées dans le tableau suivant.

Capteur	Cible	Date	Mode	Fauchée	Polarisation	Nombre de vues	Corr.	Incid.	Rés.
CS	Adré	07/09/2008	Stripmap	10x10 km	HH	3	GEC	40°	5m
TSX	Adré	14/03/2008	Stripmap	15x20 km	HH/HV	6,5	EEC	28°	6,6m
TSX	Adré	06/09/2008	Stripmap	15x20km	HH	6,1	EEC	28,73°	3,2m
TSX	Biltine	22/09/2008	Stripmap	15x15km	HH	6,1	EEC	39,2°	2,9m
TSX	Salamat	05/09/2008	Stripmap	15x30km	HH/VV	6,6	EEC	44,86°	6m
TSX	Touloum	12/09/2008	Stripmap	15x20km	VV	6,5	EEC	37,28°	2,9m
TSX	Abéché	16/09/2008	Spotlight	5x5km	HH	6,1	EEC	52°	1,5m
TSX	Laï	11/09/2008	Spotlight	5x5km	VV	6,1	EEC	41°	1,7m
TSX	Laï	04/09/2008	Spotlight	5x5km	HH	6,1	EEC	45°	1,6m

Tableau 12 : Caractéristiques des images radar utilisées pour l'étude

4.3.2. Estimation de l'humidité des pistes et des sols

4.3.2.1. Prétraitements radiométriques des images THR radar

Le prétraitement radiométrique des images radar TerraSAR-X et Cosmo-Skymed concerne la **réduction du speckle** et la **calibration du signal** en valeur de rétrodiffusion surfacique (sigma nought). Les **effets de relief**, résultant des distorsions géométriques du signal en distance induites par la visée latérale, ne peuvent pas être corrigés radiométriquement. Les corrections géométriques appliquées en pré-production ne compensent que l'effet de repliement (décalage des versants et des sommets vers le capteur) Ces effets radiométriques, surbrillance des versants face à l'antenne (raccourcissement) et ombrage, ont donc été exclus des calculs.

4.3.2.1.1. Réduction du speckle

Le speckle, ou chatoiement est produit par la variation de cohérence de l'onde radar émise par le capteur, à la fois dans l'espace et le temps (Goodman, 2007). Les échos élémentaires rétrodiffusés par les objets de la surface s'additionnent à l'intérieur de chaque cellule de restitution en produisant localement un décalage de phase (Goodman, 1976). Le speckle est considéré comme un bruit multiplicatif, indépendant du signal. Il est défini par des variables statistiques locales (moyenne et variance), dont les variations sont plus importantes dans les zones claires que dans les zones sombres. Sur l'image, il se présente comme une granularité (ou bruit) aléatoire.

Le traitement du speckle consiste à estimer le bruit à partir du signal observé et de le réduire tout en préservant la radiométrie et les informations texturales de l'image. Il est réalisé par une opération de filtrage, caractérisé idéalement par une élimination parfaite du speckle et une restauration parfaite du signal original.

Ces filtres sont appliqués **avant** la calibration radiométrique de l'image. En pratique, la qualité du filtrage dépend de l'hétérogénéité de la surface observée, et des propriétés statistiques du speckle, spécifique à un type d'image. Il n'existe donc pas de filtre universel (Smara, 2005).

Parmi ces méthodes, nous avons considéré les filtres adaptatifs comme les plus appropriés au traitement des images TerraSAR-X et Cosmo-Skymed. Ils sont basés sur les paramètres statistiques de premier ordre du speckle (densité de probabilité) et de la scène (moyenne et coefficient de variation) à restaurer (Nezry, 1992) :

- Les filtres de **Lee** (Lee, 1980), **Kuan** (Kuan, *et al.*, 1985) et **Frost** (Frost, *et al.*, 1982) supposent que la fonction de densité de probabilité du speckle suit une loi de Rayleigh (comme c'est le cas pour les images 1 vue de type ERS ou ASAR), sur une image d'amplitude ;
- Les filtres **gamma-MAP** (Maximum a posteriori) considèrent que la distribution du speckle suit une loi Gamma (Nezry, 1992) ;
- Les filtres « **améliorés** » de **Lee et Frost** appliquent les fonctions des filtres Lee et Frost pondéré par le coefficient de variation local de l'image (Lopes, *et al.*, 1990). Le coefficient de variation local représente la somme des hétérogénéités de la surface et du bruit (Lopes, *et al.*, 1990). Dans une zone parfaitement homogène, la variation de signal n'est alors plus que celle du bruit.

Les filtres multi-résolution par transformée en ondelettes n'ont pas été testés sur ces images. Réputés pour leur capacité de lissage important, ils ne préservent cependant ni la radiométrie ni la texture des surfaces (Lopes, *et al.*, 1993; Nezry, *et al.*, 1995).

Sur nos images, seul le lac d'Adré correspond à la description d'une zone parfaitement homogène. Les variables statistiques locales du bruit ont alors été calculées sur la surface commune du lac, pour les deux saisons. La distribution des valeurs de speckle sur cette surface se rapproche ainsi d'une loi gamma, quelque soit le capteur ou la saison considéré.

Nous avons ensuite comparé la qualité de chacun des filtres sur cette zone homogène en recherchant tout d'abord la taille de fenêtre optimale sur une image (Figure 121). Les paramètres statistiques et la fenêtre optimale spécifique à chaque filtre sont ensuite reportés sur la seconde image (Figure 122). La zone de calcul filtrée doit présenter la variance de speckle minimale (idéalement égale à zéro).

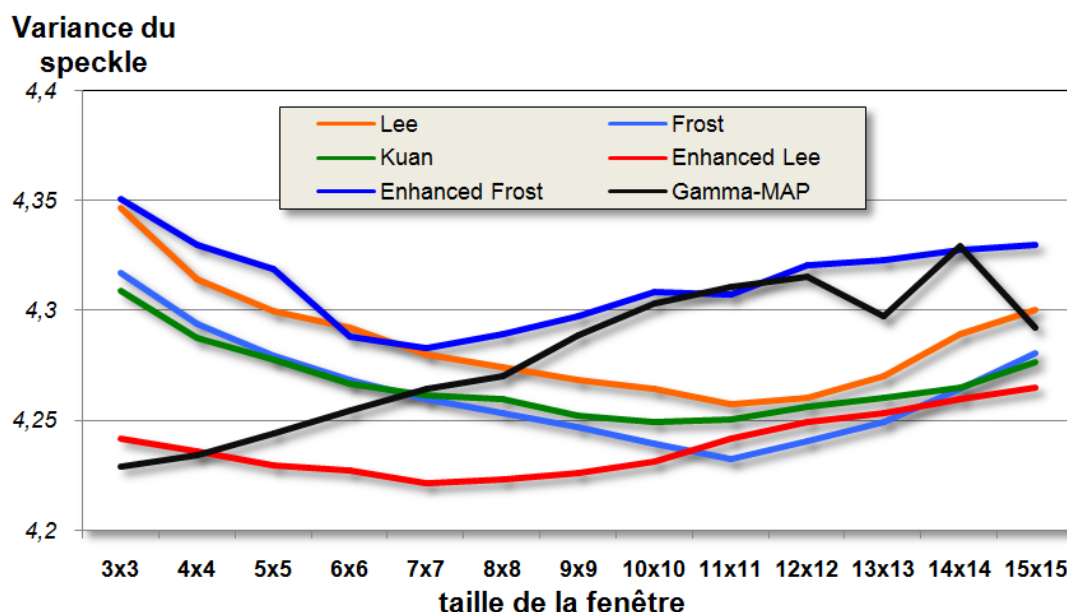


Figure 121 : Variance du lac d'Adré en fonction de la taille de la fenêtre, pour 6 filtres adaptatifs

Les filtres Lee et Frost sont plus efficaces en utilisant une taille de fenêtre (ou noyau du filtre) de 11 x 11 pixels. Les filtres améliorés de Lee et Frost connaissent un optimum pour des noyaux plus petits, à 7x7 pixels. Le filtre Gamma-MAP est efficace pour une taille de noyau minimal. Lorsqu'on augmente la taille de fenêtre, les valeurs radiométriques des régions adjacentes parasitent la zone de calcul.

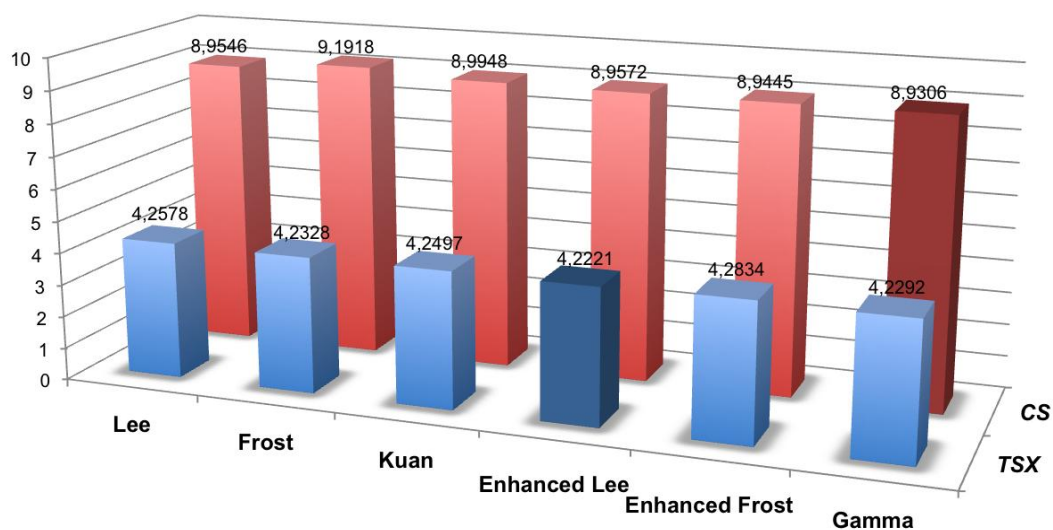


Figure 122 : Variances de la zone du lac d'Adré après filtrage adaptatif, pour les capteurs Cosmo-Skymed et TerraSAR-X

La radiométrie de l'image Cosmo-Skymed de fin de saison des pluies est environ deux fois plus élevée que l'image TerraSAR-X de fin de saison sèche, ce qui explique l'écart entre les deux séries de valeurs. Les résultats des filtres appliqués à la zone de calcul sont très proches aussi bien visuellement que par le calcul. Toutefois, sur l'ensemble de l'image, les filtres Lee, Frost et Kuan donnent l'impression d'un effet de flou généralisé, alors que le filtre Gamma-MAP préserve voire accentue la radiométrie.

L'analyse statistique des filtres adaptatifs sur la zone de calcul favorise les filtres « améliorés » et Gamma-MAP, sans privilégier l'un par rapport à l'autre. Cependant, appliqué à l'ensemble de l'image, nous avons remarqué que le filtre Gamma-MAP préserve mieux les textures et les contours des zones de différents degrés d'intensité. En effet, son application avec une fenêtre réduite de 3x3 pixels limite l'effet de flou observé avec des noyaux plus larges (Figure 123). En conséquence, le filtrage adaptatif par l'algorithme Gamma-MAP a été appliqué à toutes les images étudiées.

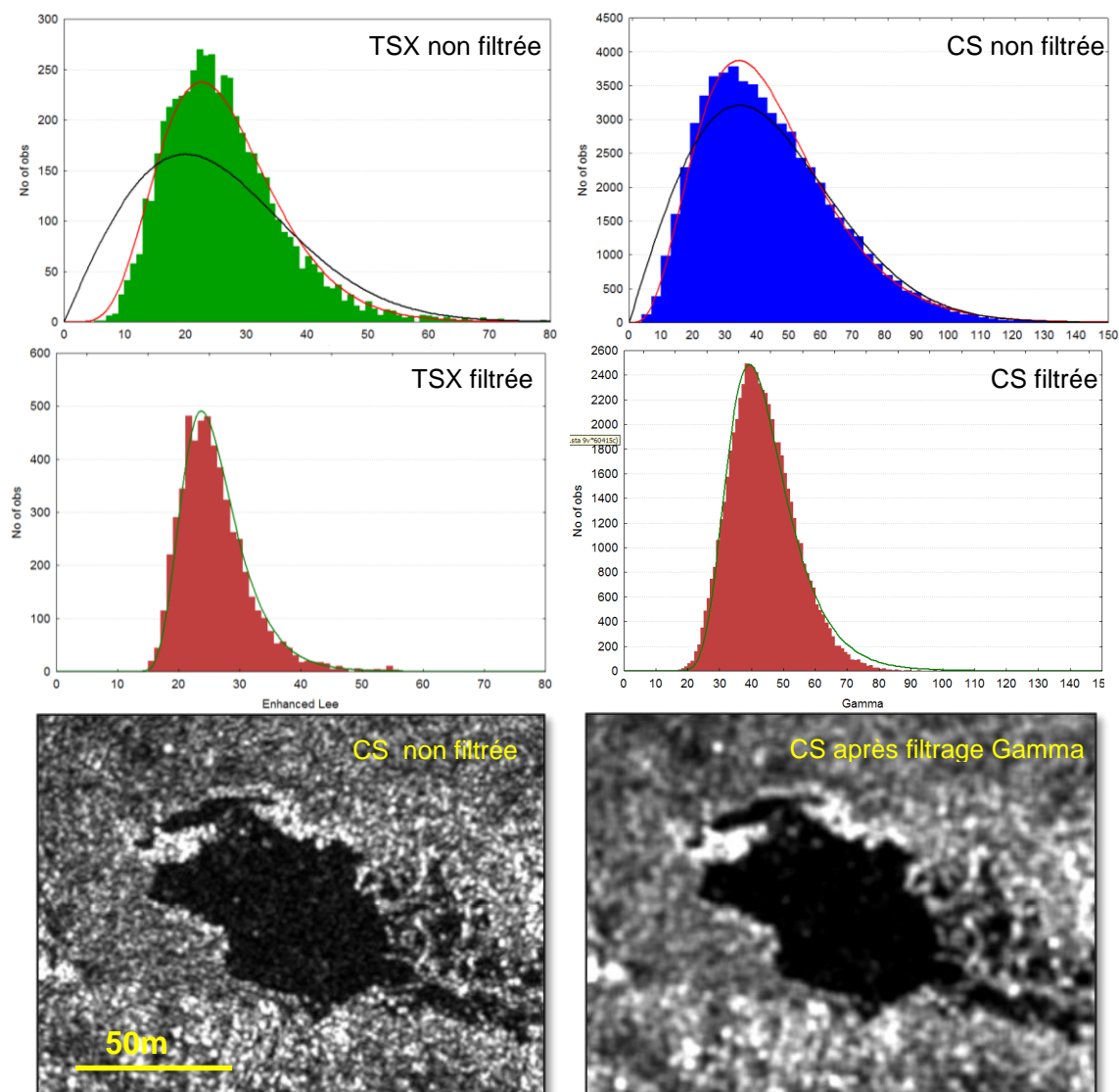


Figure 123 : Distribution des valeurs de speckle sur le lac d'Adre avant calibration, puis filtrée.

Sur chacune des deux images, TerraSAR-X à gauche et Cosmo-Skymed à droite, la distribution du speckle suit une loi gamma (en rouge, loi de Rayleigh en noir). L'application du filtre statistiquement le plus favorable (Figure 122), préserve la radiométrie moyenne de la zone tout en réduisant l'histogramme de valeur de signal. La variation résiduelle de signal de la zone spéculaire (lac) devient alors négligeable. Les contours des zones d'intensités variables sont légèrement accentués.

4.3.2.1.2. Calibration radiométrique

La calibration radiométrique a pour objectif de rendre cohérente la comparaison des valeurs absolues de coefficient de rétrodiffusion, quelque soit le capteur, l'incidence, la saison ou la polarisation des images, en corrigeant l'effet de variation angulaire latérale. Elle a été réalisée systématiquement sur toutes les images étudiées, en suivant la procédure décrite dans le guide de calibration du capteur TerraSAR-X (Infoterra, 2008).

Les images des capteurs TerraSAR-X et Cosmo-Skymed sont codées en amplitude de brillance, ou Beta nought. La calibration de ces images est réalisée en deux étapes :

- la **réduction du bruit radiométrique** causée par l'antenne (puissance de transmission, variation d'altitude de l'antenne, bruit du récepteur,...) ;
- la transformation de la brillance, codée en distance, en **valeur de coefficient de rétrodiffusion surfacique** (sigma nought), corrigée du bruit (Figure 124).

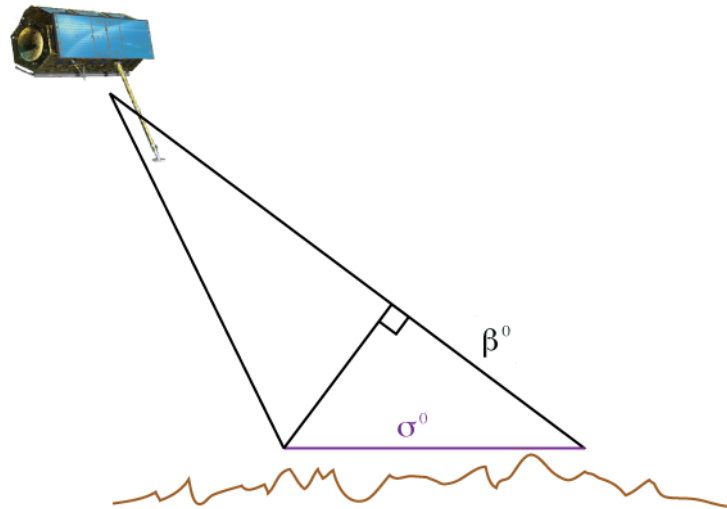


Figure 124 : Géométrie de codage du signal en brillance (Beta nought) et coefficient de rétrodiffusion (sigma nought)

Le **bruit radiométrique** de l'antenne (Noise Equivalente Beta Nought, NEBN) dépend de l'image et du type de capteur. Il est exprimé par une fonction polynôme d'ordre variable (6 pour les images TerraSAR-X level 1B), renseigné dans les métadonnées de l'image (Figure 125). Il est enregistré en vol automatiquement, et n'est valable que pour un intervalle de temps très court. Les images Stripmap TerraSAR-X contiennent alors 6 acquisitions de bruit successives, et les images en mode Spotlight 3 (Infoterra, 2008). Il s'écrit :

$$NEBN = k_s \cdot \sum_{i=0}^{\deg} \text{coeff}_i \cdot (\tau - \tau_{ref})^i, \tau \in [\tau_{min}, \tau_{max}]$$

avec :

k_s	coefficient de conversion radiométrique
\deg	ordre du polynôme
coeff_i	coefficient d'ordre i
τ_{ref}	temps de référence
τ_{min}, τ_{max}	intervalle de validité du polynôme

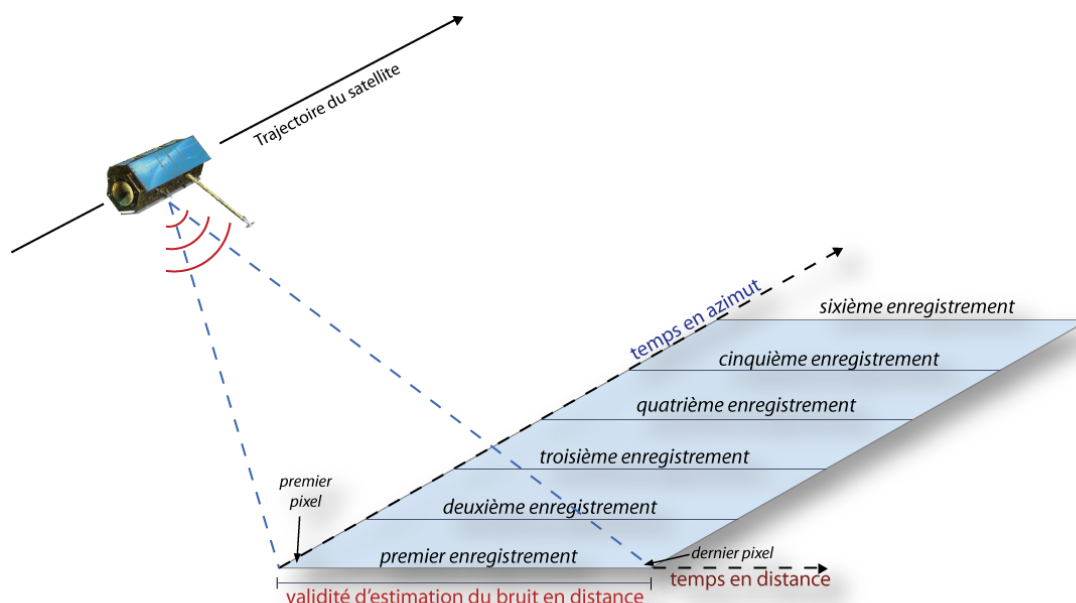


Figure 125 : Configuration d'estimation du bruit sur le mode stripmap du capteur TerraSAR-X

L'image Stripmap est acquise sur un laps de temps d'environ 8s. Sur cet intervalle, le bruit capteur a été corrigé 6 fois. L'image est donc divisée en six périodes azimutales de validité d'environ 1,5s.

Nous illustrons ces corrections sur l'image TerraSAR-X d'Adre, acquise en mode Stripmap le 14 mars 2008. Le bruit moyen en beta nought est d'environ -15dB. Le capteur était à cette date en période de réglage, ce qui explique cette valeur relativement élevée. Sur les images de saison des pluies acquises six mois plus tard, le bruit descend à environ -29 dB, équivalente au bruit de fond résiduel du signal (Figure 126).

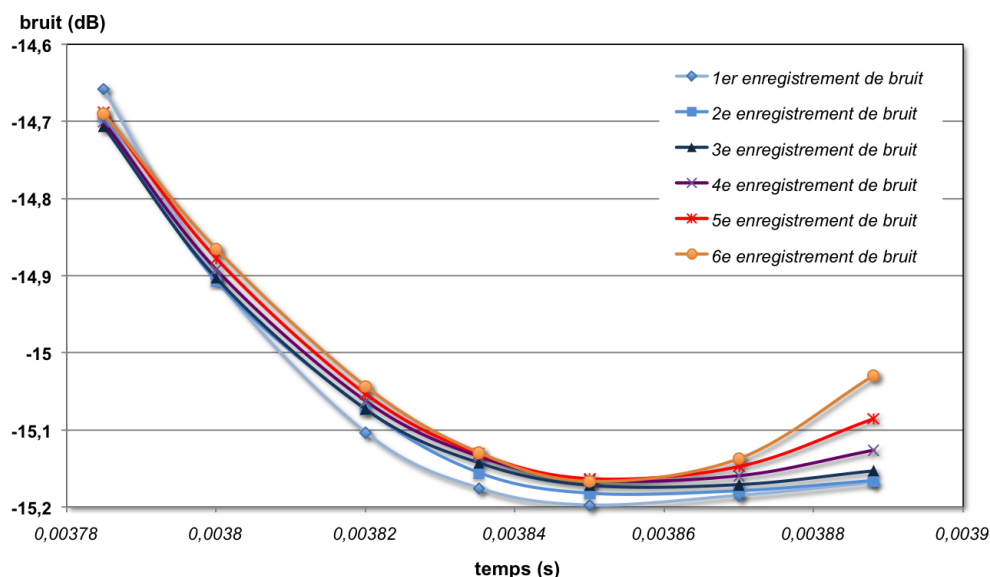


Figure 126 : Contribution du bruit à six périodes de temps en azimuth (valeurs réelles) sur l'image TerraSAR-X d'Adré du 14 mars 2008

La contribution du bruit sur l'image ne croît pas linéairement. L'écart moyen du bruit entre la première et la dernière acquisition est d'environ 0,05 dB.

Le **coefficient de rétrodiffusion** σ^0 d'une cible au sol (sigma nought) est influencé par l'orientation relative de la cellule illuminée et du capteur, ainsi que par la distance entre eux. La correction radiométrique du signal en sigma nought requiert ainsi une connaissance de la pente locale. Elle est calculée à partir des valeurs d'incidence locale de l'antenne. La conversion des valeurs de pixels en sigma nought s'écrit (Infoterra, 2008) :

$$\sigma^0 = \left(k_s \cdot |DN|^2 - NEBN \right) \cdot \sin \theta_{local} \quad \sigma_{dB}^0 = 10 \log(\sigma^0)$$

Les valeurs du coefficient de rétrodiffusion, après correction du bruit, sont comprises entre -30 dB (surfaces spéculaires) et +10 dB (réflexion multiple). Le bruit des images de saison sèche est au delà des spécifications de qualité de l'opérateur TerraSAR-X. Nous avons pris le risque d'exploiter tout de même cette image pour une région. Les valeurs radiométriques de cette image sont donc à considérer avec prudence.

4.3.2.2. Interprétation des images radar THR

L'interprétation des images radar THR à pour objectif l'étude du comportement du signal radar en fonction de l'humidité des sols et des pistes, ainsi que de la sensibilité du signal radar aux variations de paysages et d'humidité, en fonction de paramètres capteur :

- Le coefficient de rétrodiffusion est étudié sur deux images d'une même zone géographique, en saison sèche et humide, et pour des caractéristiques capteurs parfaitement identiques. L'observation de son évolution sur plusieurs types de sols et pour différentes conditions d'humidité permettra d'apporter de nouvelles informations quant au potentiel de ces capteurs pour la restitution de l'humidité des sols.
- La sensibilité du signal est ensuite étudiée par le biais de deux modes de polarisation, sur deux images de saison humide de région distinctes. Nous espérons ainsi conclure sur la définition d'une configuration optimale pour la restitution d'humidité.
- Enfin, nous avons étudié le comportement du signal sur les routes, pistes et sentiers sur deux images acquises au mode de résolution le plus fin. Ces objets linéaires n'ont encore été caractérisés par aucun capteur satellitaire radar. L'interprétation du signal concerne d'une part la capacité de détection des nouveaux capteurs, et d'autre part la restitution de la praticabilité des axes et des éventuelles voies de contournement.

4.3.2.2.1. Préparation des données d'interprétation

Les images radar THR, après filtrage et calibration radiométrique, présentent toujours une très forte hétérogénéité du signal. L'interprétation de l'image en zones d'intensité de signal est plus ou moins réalisable visuellement, mais une analyse de l'image pixel par pixel ne donne pas de résultats cohérents. Nous avons donc appliqué une segmentation par contours, afin de partitionner l'image en zones de radiométrie et de géométrie homogènes.

Nous avons étudié les paramètres de date et de polarisation en construisant une image à trois composantes. Cela nous permet d'une part d'assurer un confort d'interprétation visuelle, et d'autre part de générer un partitionnement identique pour les deux phénomènes observés (équivalent à une intersection topologique de polygones) :

- Sur la région du Salamat, nous avons comparé les valeurs de signal d'une acquisition double polarisation HH-VV (Figure 127). La troisième composante est le résultat de la soustraction HH-VV. L'image est datée du 5 septembre 2008. L'incidence du capteur est de 45°. La taille du pixel au sol est de 3,3m.

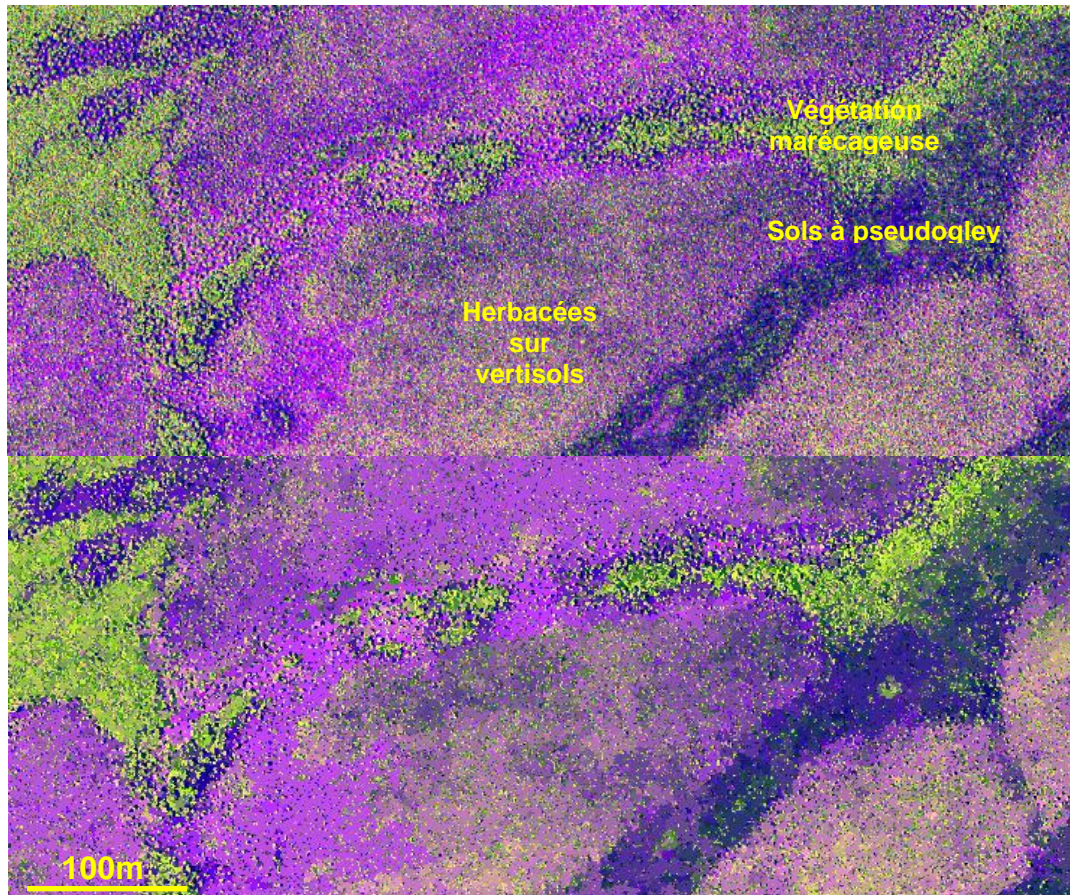


Figure 127 : Composition colorée de l'image double polarisation HH-VV de Salamat, avant et après segmentation

La double polarisation met en évidence les différents paysages (sol-végétation) de la zone du Salamat. Essentiellement marécageuse, cette région est occupée par une végétation dense, et une alternance de zones sableuses (en indigo et violet) et argileuses (rose clair). Les informations d'occupation du sol sont interprétées de cartes pédologiques et de sources ouvertes d'imagerie optique THR Quickbird. Sur la zone de Salamat, à l'inverse de la zone d'Adré, les surfaces sont homogènes, avec des points de radiométrie élevée, correspondant à des buissons isolés. Les partitions sont étendues, et par conséquent moins nombreuses (ce qui réduit le temps de calcul). Taille de l'image : 741*312 pixels

- Sur Adré, nous avons comparé deux images en mode stripmap, datée du 14 mars 2008 (saison sèche) et du 6 septembre 2008 (saison humide). La troisième composante est le résultat de la soustraction des valeurs des deux premières bandes. (Figure 128). La configuration des deux capteurs est identique, polarisation HH et 28° d'incidence. Nous avons rééchantillonné par une division de facteur 2 l'image de saison sèche (1,6m au sol initialement), par convolution bicubique.

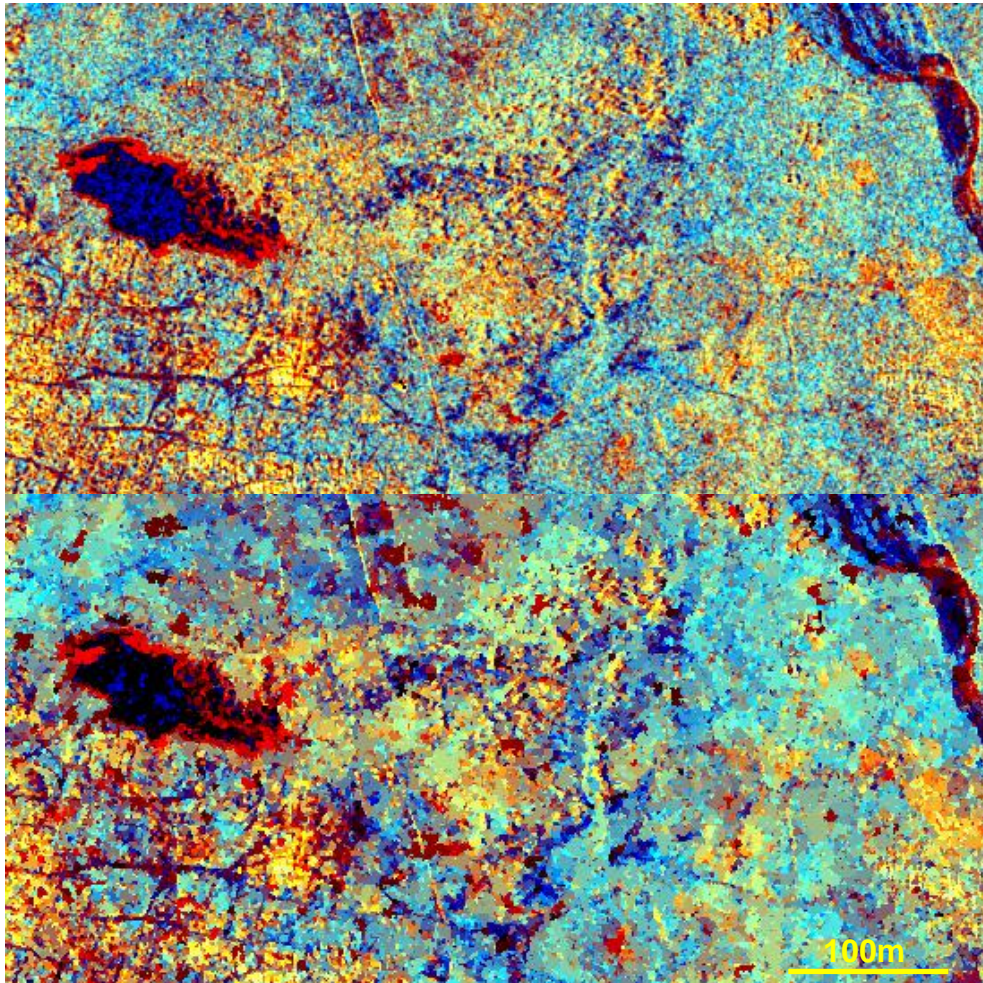


Figure 128 : Composition colorée des images de saison sèche et humide d'Adré, avant et après le processus de segmentation

Les zones rouges traduisent des surfaces sèches en mars puis inondées. Les zones bleu- nuit sont inondées sur les deux périodes. Le jaune est représentatif des fortes réflexions (maisons, arbres, murets) sur les deux périodes. Enfin le dégradé de bleu clair à foncé correspond à des zones sableuses à argileuses devenues humides à inondées au mois de septembre. Nous avons paramétré l'algorithme de segmentation pour créer des partitions de petite taille, afin de conserver l'hétérogénéité de l'image. Les valeurs attributaires de moyenne de signal associées à chaque segment sont alors très proches des valeurs originelles. Cela se traduit visuellement par une conservation des couleurs. Taille de l'image : 550*274 pixels.

Une fois l'image segmentée, une phase de « nettoyage » est nécessaire, afin de séparer les segments représentatifs de la surface du sol et les autres. Il est réalisé par un seuillage des attributs :

- de la moyenne des valeurs d'amplitude à -5dB. Les réflecteurs multiples (arbres, murets, bâtisses, rochers) se manifestent sur l'image par une valeur anormalement élevée d'intensité du signal ;
- des écarts type des valeurs d'amplitudes et de texture à -2dB. En période humide, le paysage désertique se couvre d'une couverture végétale herbeuse, qui n'est pas pénétrée uniformément par le signal. Ce critère permet un contrôle sur l'homogénéité du segment analysé.

4.3.2.2.2. Comportement du signal en fonction de l'humidité des sols

Chaque image couvre 450 km² et contient en moyenne 2 à 3 millions de segments. Nous avons sélectionné des échantillons des types de sols représentatifs de chaque zone d'étude, en nous appuyant sur les images Quickbird de Google Earth de 2006 en tant que vérité terrain.

Entre saison sèche et saison humide

La principale difficulté de l'analyse multitemporelle dans cette région concerne la métamorphose du paysage avant et après la saison des pluies. En effet, la zone sub-désertique du mois de mars se transforme au mois de septembre en une savane herbacée largement occupée par des parcelles agricoles (Figure 129). Nous avons respecté cette contrainte en ne prenant en compte que des surfaces identiques toute l'année.



Figure 129 : Evolution du paysage dans la région d'Adré, entre la fin de saison sèche (6 juin 2005) et la fin de saison des pluies (5 septembre 2005), observé sur imagerie Quickbird

En saison sèche l'Ouaddaï est caractérisé par un paysage désertique : absence de végétation à l'exception de quelques arbres, oueds à sec, pas de cultures. Au recul de la mousson, à partir du mois de septembre, les surfaces a priori vierges et inexploitées se transforment en champs, prairie, marécages, ou, selon leur position topographique, restent inchangées. L'organisation spatiale de ces parcelles est saisonnière, et varie chaque année. Taille des images : 300*550 pixels.

Nous avons considéré cinq sols de textures différentes, présents sur l'image radar. Ils sont associés chacun à un type de paysage, et ne sont pas utilisés pour des travaux agricoles. Chacun d'eux se caractérise par une couleur spécifique sur l'image optique THR. Nous avons également intégré à l'analyse deux surfaces particulières : le lac d'Adré, en eau toute l'année, et un étang au nord d'Adré, qui représente l'unique zone humide en saison sèche.

	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)
Sols ferrugineux peu lessivés sableux	10,5	7,5	82
Sols ferrugineux lessivés argileux	19,5	9,5	71
Vertisols sur arène granitique	18,5	6,5	75
Alluvions fluviatiles argilo-limoneuses	24,5	19,5	56
Sols halomorphiques argileux	24	15	61

Tableau 13 : Composition moyenne des sols de la région d'Adré, en argile, limon et sable

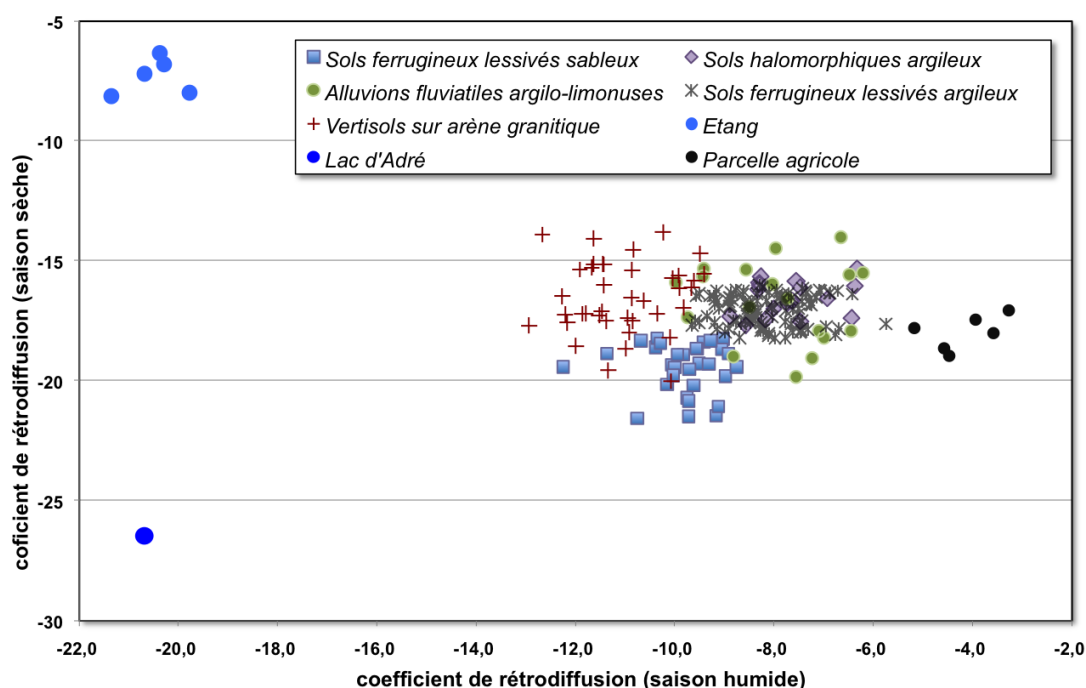


Figure 130 : Coefficients de rétrodiffusion des sols de la région d'Adré, extrait des images TerraSAR-X du 14 mars et du 6 septembre 2008.

Les zones inondées en saison humide, lac d'Adré et étang, présentent logiquement les coefficients de rétrodiffusion les plus faibles à -22dB. En saison sèche, les sols nus sont indissociables par leurs valeurs de rétrodiffusion. En saison sèche, les valeurs s'étalent sur une gamme de -12 à -4 dB, en fonction de leur humidité et / ou rugosité.

Le coefficient de rétrodiffusion des surfaces analysées augmente d'en moyenne 4 à 8 dB entre les deux saisons, que nous pouvons relier à une augmentation d'humidité. En effet, les zones humides autour de l'étang et de l'oued d'Adré présentent des conditions d'humidité comparables. Ces sols de texture argileuse identique présentent, sur les deux images, des valeurs de signal comparables, d'environ -8 dB.

Tous les types de sols présentent en saison sèche de très faibles coefficients de rétrodiffusion, entre -15 et -20 dB. Ces valeurs sont caractéristiques de sols très secs, se comportant comme des surfaces quasiment spéculaires. Cette interprétation est cohérente avec leur observation sur imagerie optique. En saison humide, le signal est légèrement plus élevé pour des sols argileux (de -9 à -6 dB), d'environ 3 dB par rapport aux sols sableux (-12 à -9 dB), à l'exception des vertisols. Il correspond à une plus forte humidité des sols argileux, localisés dans les dépressions, par rapports aux sols sableux, répartis sur les plateaux et versants.

Les sols des parcelles agricoles, labourés à la faveur de la saison des pluies, sont les plus réflecteurs (-5 à -3 dB). Ces valeurs sont très proches des mesures de Holah (2005), réalisées sur les sols agricoles par capteur aéroporté RAMSES, dans une longueur d'onde et une configuration capteur identique au notre (bande de fréquence X, polarisation HH et 28° d'incidence).

En nous basant sur la méthode de Le Hégarat-Masclé *et al.*, (2002), on peut estimer l'humidité des sols par le coefficient de rétrodiffusion entre 23 et 30% pour les sols à majorité argileuse et de 16 à 22% pour les sols sableux.

Sur une acquisition double polarisation HH-VV

La zone du Salamat couverte par l'image est vierge de routes, champs et villages. Cependant, ce secteur subdésertique se transforme avec la saison humide en une grande région marécageuse. L'imagerie optique THR Google Earth date de fin de saison sèche et n'apporte aucun indice sur l'occupation du sol après la mousson. L'interprétation de ce secteur et de ses différentes strates paysagères ne peut être réalisée qu'à partir d'une imagerie radar. L'image couvre 450km² et se partitionne en exactement quatre zones d'intensité de signal différentes. Les informations de sols sont extraites des cartes et profils pédologiques régionaux que nous avons synthétisés.

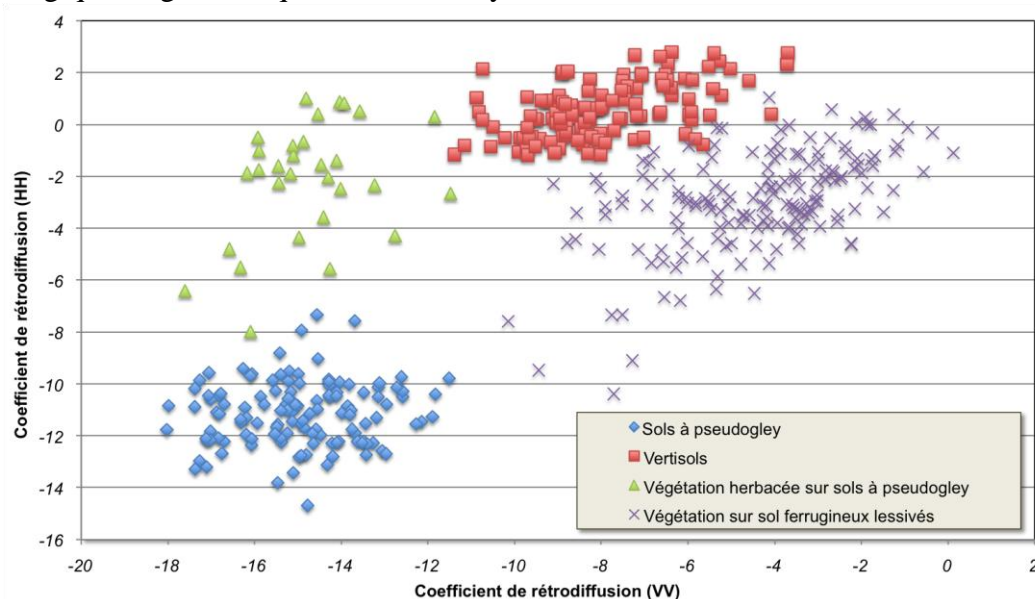


Figure 131 : Coefficients de rétrodiffusion en polarisation HH et VV des différents secteurs de l'image de Salamat.

Les quatre zones de l'image du Salamat se répartissent entre -18 et +4 dB. Ces valeurs sont en moyenne plus élevées que sur Adré, expliquées par la présence d'une couverture végétale importante. Au dessus de -5dB dans les deux polarisations, l'augmentation du signal liée à l'humidité se ne se distingue plus de la rétrodiffusion volumique induite par la végétation.

	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)
Sols à pseudo-gley à taches, sur alluvions sableuses	10,5	6,5	83
Vertisols hydromorphes sur matériau argileux	58,5	13	28,5
Sols ferrugineux lessivés	5,8	8,8	85,4

Tableau 14 : Composition moyenne des sols de la région de Salamat, en argile, limon et sable

On constate que les coefficients de rétrodiffusion en polarisation VV sont en moyenne inférieurs de 4 à 12 dB par rapport à la polarisation HH. Ces valeurs élevées sont caractéristiques de zones végétalisées. La double polarisation permet de distinguer les différents types de sols sous couvert arboré et/ou herbacé :

- Les vertisols sont marqués par de forts coefficients de rétrodiffusion en polarisation HH (- 2 à +2 dB). Ils traduisent la présence de végétation sur cette zone. Le signal de polarisation VV, inférieur d'environ 8 dB, traduit une forte humidité ;
- Les sols à pseudogley nus affichent les coefficients de rétrodiffusion les plus faibles de la zone. La présence de végétation n'augmente le signal polarisé HH d'environ 10 dB, alors que le signal VV reste identique ;
- Les très fortes valeurs de signal des sols ferrugineux lessivés proviennent de la multiréflexion de la végétation arbustive qui les recouvre. Elle se traduit par un signal d'égale intensité selon la polarisation.

En appliquant les coefficients de conversion du signal radar en humidité sur la polarisation HH, on obtient, pour les surfaces non ou peu végétalisées, des valeurs comprises entre 20 et 35%. Ces taux d'humidité sont très comparables aux résultats obtenus sur Adré.

4.3.2.3. Comportement du signal en fonction de l'humidité des pistes

L'étude des axes tchadiens par imagerie radar est délicate car elle est en limite de détection de capteur. Dans le mode le plus fin, la résolution des capteurs est équivalente à la largeur des pistes des plus étroites, tandis que les plus larges représentent jusqu'à 4 pixels. L'impact de la résolution intervient sur les valeurs d'amplitude de l'image. Il peut altérer l'interprétation lorsque l'objet est plus petit que la résolution capteur mais plus grand que le pixel de l'image.

L'étude du comportement du signal des axes routiers du Tchad méridional est focalisée sur les régions de Laï et d'Abéché. Les images ont été acquises en saison des pluies (4 et 11 septembre 2008), en polarisation VV et HH et pour une incidence d'environ 40°. Nous avons constaté sur les deux capteurs THR qu'à de fortes incidences ($\geq 40^\circ$) la polarisation HH est plus sensible aux mécanismes de diffusion de surface et apporte ainsi plus d'informations sur les caractéristiques d'humidité et de rugosité. Le signal de polarisation HH est ensuite comparé avec leur structure en saison sèche sur imagerie optique THR. L'analyse des caractéristiques optiques et radar des routes et pistes des deux régions observées nous permet de les classer en trois catégories :

- Un **réseau de routes**, larges d'au moins 6m, très fortement dégradé et impraticable localement. Leur observation sur imagerie optique met en évidence un réseau de chemins de dérivation latéraux, parallèles à l'axe principal. Sur l'image radar de septembre 2008, le signal de l'axe principal alterne régulièrement (tous les 100m environ) entre trois formes :
 - o Soit il est identique à celui du sol environnant (-10 à -15 dB). On peut déduire dans ce cas qu'il n'a pas été emprunté durant la saison humide ;

- Soit il présente deux traits sombres (-15 à -20 dB). Cette signature traduit d'une part que les deux voies ont été empruntées pendant la saison humide, et que d'autre part elles se sont remplies d'eau (ces valeurs sont similaires à celles du fleuve Logone). L'axe a donc enregistré des dégradations très importantes ;
- Soit il présente un large trait sombre (-17 à -25 dB), significatif d'une large portion de route inondée. L'axe est impraticable sur ce tronçon.

A côté de l'axe principal, les chemins extérieurs ont des coefficients de rétrodiffusions compris en -27 et -22 dB, que nous pouvons également interpréter en surfaces inondées.

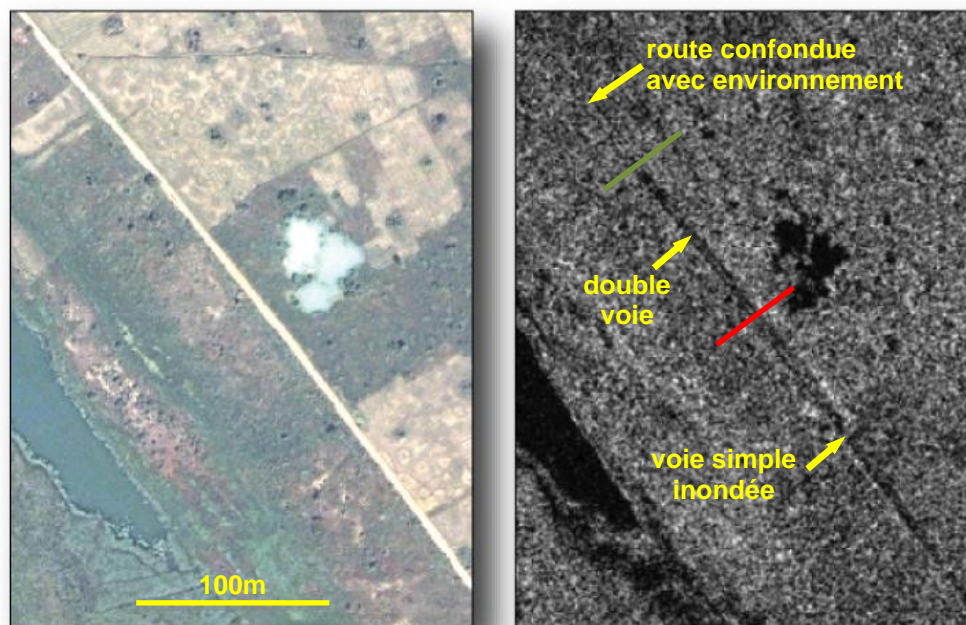


Figure 132 : Extrait du réseau de routes sur imagerie optique et radar THR

Ce réseau relie les villes de Bongor, au nord et Doba, au sud. Sur cet extrait situé au sud de Laï, la route se caractérise par un seul axe principal. L'image radar divise cet axe en tronçons de praticabilité variable : tronçon inondé, tronçon praticable et tronçon confondu avec le sol environnant. Taille des images : 330*500 pixels.

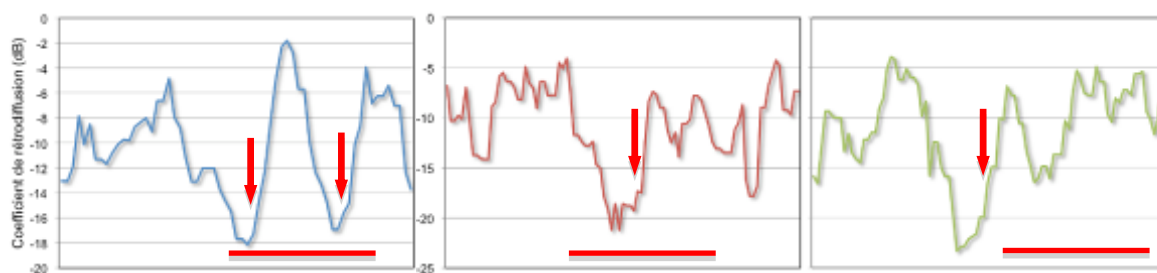


Figure 133 : Profils types de coefficients de rétrodiffusion des routes, extraits des images de Laï et Abéché

Ces profils ont été tracés transversalement sur des portions caractéristiques du réseau de routes à double voies qui traverse les images de Laï et Abéché. Ils comptent exactement 90 pixels de long, soit environ 70m. Les flèches indiquent les zones inondées, et la barre la largeur de la route sur imagerie optique. Le profil le plus à gauche est extrait d'un tronçon à deux voies, celui du milieu d'un tronçon inondé sur toute la largeur, et celui de droite sur un secteur où la route est confondue avec le sol environnant.

- Un **réseau de pistes**, larges de 3 à 6m, également très fortement dégradées et impraticable sur pratiquement toute leur longueur. Leur nature est identique au sol environnant. Les voies de dérivation se prolongent en général sur plusieurs centaines de mètres. La signature radar de ces axes se marque par un trait sombre principal pratiquement continu (-15 à -20 dB), de quelques pixels de large.

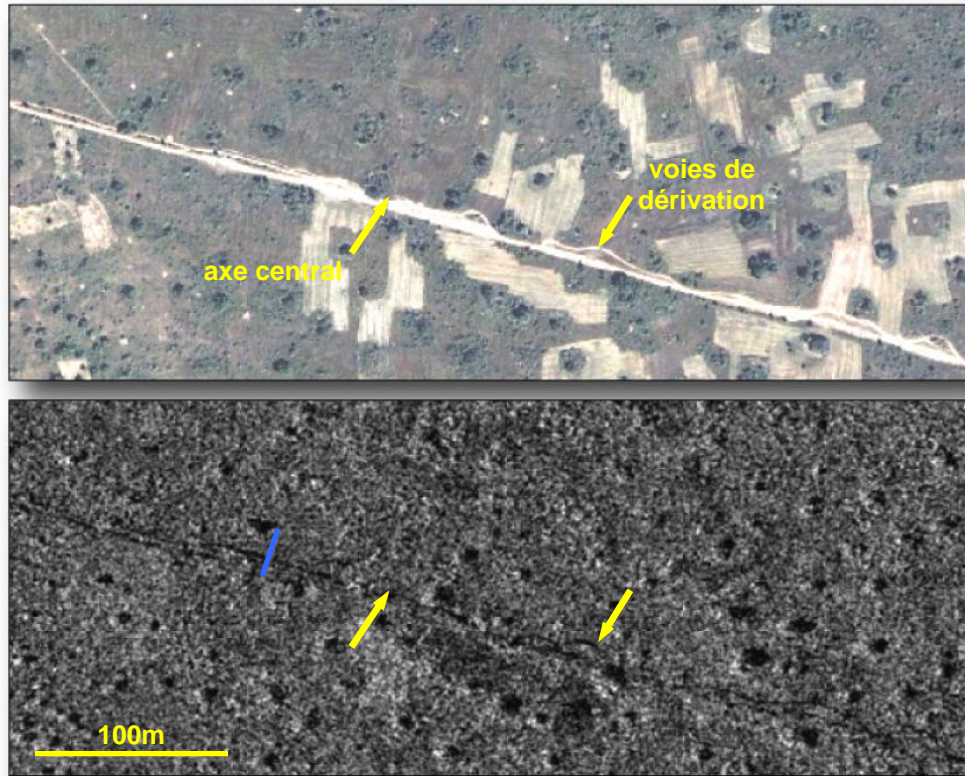


Figure 134 : Extrait du réseau de pistes sur imagerie optique et radar THR

Le réseau de pistes relie les villes secondaires. Ce réseau est parcouru de voies de dérivation empruntées toute l'année. L'imagerie radar traduit que ce sont effectivement ces chemins qui sont empruntés et non l'axe central. Taille des images : 830*352 pixels.

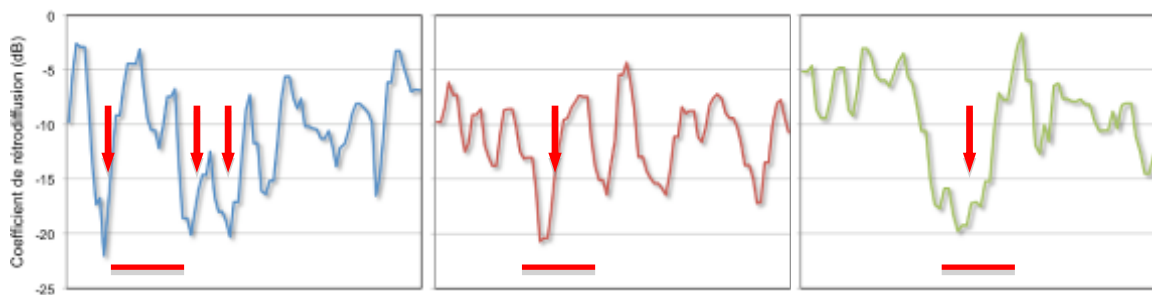


Figure 135 : Profils types de coefficients de rétrodiffusion des pistes, extraits des images de Lai et Abéché

Sur le profil de gauche, l'axe central est marqué par de forts coefficients de rétrodiffusion, caractéristiques de sol rugueux humide. Les voies de dérivation sont inondées. Le profil central traduit une inondation commune de l'axe central et de dérivation. Enfin, sur le profil de droite l'axe est inondé sur toute la largeur.

- Un **réseau de sentiers**, inférieurs à 3m de large. Ces chemins locaux (ils relient les villages entre eux) sont beaucoup moins dégradés, et ne présentent que rarement des voies de dérivation. Les sentiers qui longent la rive gauche du fleuve Logone, sont saisonniers et ne se retrouvent pas d'une année sur l'autre. Leur détection par imagerie radar est très difficile en raison de la convergence des phénomènes de rugosité et d'humidité intervenant en proportion impossible à quantifier, et d'une trop faible résolution capteur (1m).

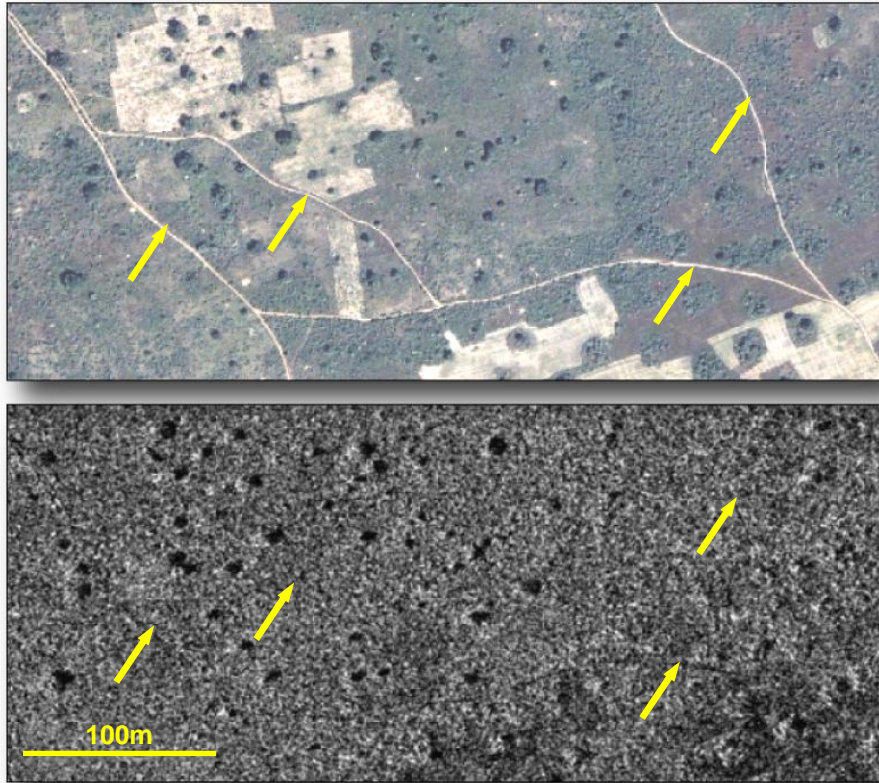


Figure 136 : Extrait du réseau de sentiers sur imagerie optique et radar THR

Ce réseau de sentiers relie les villages entre eux. Ces sentiers larges d'1 à 2 mètre ne sont empruntés que par des véhicules légers. Leur signature radar est discontinue et peu prononcée par rapport à l'environnement car elle se situe en limite de détection (par rapport à la résolution du capteur). Taille des images : 825*350 pixels.

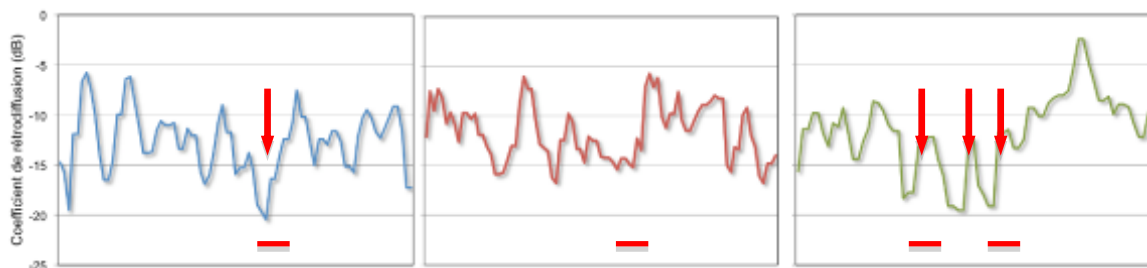


Figure 137 : Profils types de coefficients de rétrodiffusion des sentiers, extraits des images de Lai et Abéché

On observe sur ces profils que le contraste radiométrique entre les sentiers et leur environnement est faible. Les coefficients de rétrodiffusion sont également moins extrêmes, et les valeurs les plus faibles ne proviennent pas forcément de la piste, comme c'était le cas sur les types d'axes précédents.

4.3.2.4. Conclusions

Le potentiel des données radar THR en bande X pour la cartographie de l'humidité des sols et des pistes a été étudié. Le coefficient de rétrodiffusion a été acquis sur différentes polarisations, incidences, mode d'acquisition et dates. La sensibilité du signal radar aux paramètres de surfaces a été évaluée pour plusieurs configurations de capteurs et conditions d'humidité.

Nous avons observé une bonne corrélation entre le coefficient de rétrodiffusion et la texture des sols. Pour les sols secs (images de saison sèche), le signal est identique quelque soit le type de sols non labourés (-15 à -20 dB). Nous avons estimé par la méthode de Le Hégarat-Masclé *et al.*, (2002) que ce seuil correspondait à une valeur de 10 % d'humidité environ. A l'inverse, le signal sature au-delà d'une valeur de -5dB, ce qui correspondrait à des sols rugueux, humide, ou les deux.

La double polarisation n'apporte pas d'informations significatives par rapport à une polarisation unique, pour l'estimation de l'humidité des sols. En revanche, dans une perspective de mise à jour de cartographie de l'occupation du sol, elle montre la possibilité de distinguer plusieurs types de couverture végétale, en complément de données existantes (imagerie optique, cartes pédologiques).

Dans le mode le plus fin, et pour une polarisation HH, le signal radar rend compte qualitativement de l'état d'humidité des routes. Nous avons observé que les axes empruntés pendant la saison humide sont marqués par des coefficients de rétrodiffusion très faibles, équivalents à ceux des surfaces inondées. Les axes plus fins, pistes et sentiers sont en limite de détection de capteur et sont très difficiles à caractériser.

L'objectif de détection des axes intervient dans une logique d'alerte sur changement. Nous avons remarqué que certaines pistes empruntées avant la saison humide, puis recouvertes par la végétation disparaissaient à la faveur d'un nouveau réseau. Cependant, cet objectif n'est pas pleinement satisfait car les sentiers n'ont pas été détectés par imagerie radar THR.

A partir de ces travaux, nous associons à la cartographie de l'occupation du sol, extraite par imagerie optique THR (ch 4.2), une estimation d'humidité dynamique, apportée par imagerie radar THR. La précision de ces estimations est à considérer avec réserve car n'ayant pas fait l'objet de vérification ou calibration par des mesures de terrain. Des caractéristiques de nature et d'état d'humidité du sol, nous déduisons une résistance face à une contrainte verticale. Ce sujet fait l'objet de la partie suivante.

Le potentiel de mise à jour de l'occupation du sol par imagerie radar THR n'a pas été approfondi dans cette étude, mais les résultats que nous avons obtenus en multi-polarisation semblent convaincants dans cette voie.

4.4. Restitution cartographique de la traficabilité

4.4.1. *Intégration du réseau routier à la cartographie de traficabilité*

Lors de la planification des missions logistiques, la décision d'emprunter une trajectoire tout-terrain n'est prise que lorsque le risque d'emprunter la route est trop important (coupure militaire, inondation, dégâts, mines). Disposer de renseignements à jour sur le réseau routier est donc indispensable pour établir le diagnostic de traficabilité.

Notre travail n'a pas cependant pour ambition de redessiner le réseau routier sur la totalité de la zone d'étude. Nous nous appuyons sur des structures de diffusion existant dès maintenant sur l'Afrique, qui ont l'objectif de proposer un canevas complet du réseau routier pour 2011-2012. A ce jour, ces projets basés sur la collaboration des internautes et des acteurs de terrain sont encore très incomplets sur l'Afrique Centrale. C'est la raison pour laquelle nous nous limitons à apporter un complément et une mise à jour des informations disponibles par une recherche appropriée basée sur des sources ouvertes. Elles concernent l'état (dégradé, entretenu) et le type de revêtement (sol naturel, béton et bitume) du réseau.

4.4.1.1. Caractéristiques du réseau routier du Tchad méridional

Nous avons caractérisé le réseau routier tchadien par ses caractéristiques de géométrie, de nature et d'état. La nature du revêtement et l'état de la route sont associés en tant qu'attributs à la géométrie du réseau. Nous déduirons un diagnostic de praticabilité du réseau en fonction de la confrontation de ces paramètres avec les précipitations journalières. Cette démarche évite un partitionnement trop grossier du réseau en fonction du seul revêtement.

4.4.1.1.1. Nomenclature de hiérarchisation et de représentation du réseau

Il existe autant de nomenclatures du réseau routier que d'organismes chargés de les représenter : instituts géographiques (IGN), routier (Michelin), militaire, services web (Openstreetmap.org, Google MapMaker, tracks4africa,...). La largeur de la route est un paramètre physique permanent qui peut être évalué par imagerie (avec des limitations précisées plus loin). Nous nous sommes donc orientés sur un découpage hiérarchique du réseau en fonction de la largeur des axes (Figure 138) :

- les **routes** (roads) ont plus de 6 m de large. Elles relient les villes principales entre elles ;
- les **pistes** (tracks) sont larges de 3 à 6 m. Ce réseau de moindre importance relie les villes secondaires ;
- les **sentiers** (trails) ont moins de 3 m de large et relient les villages.

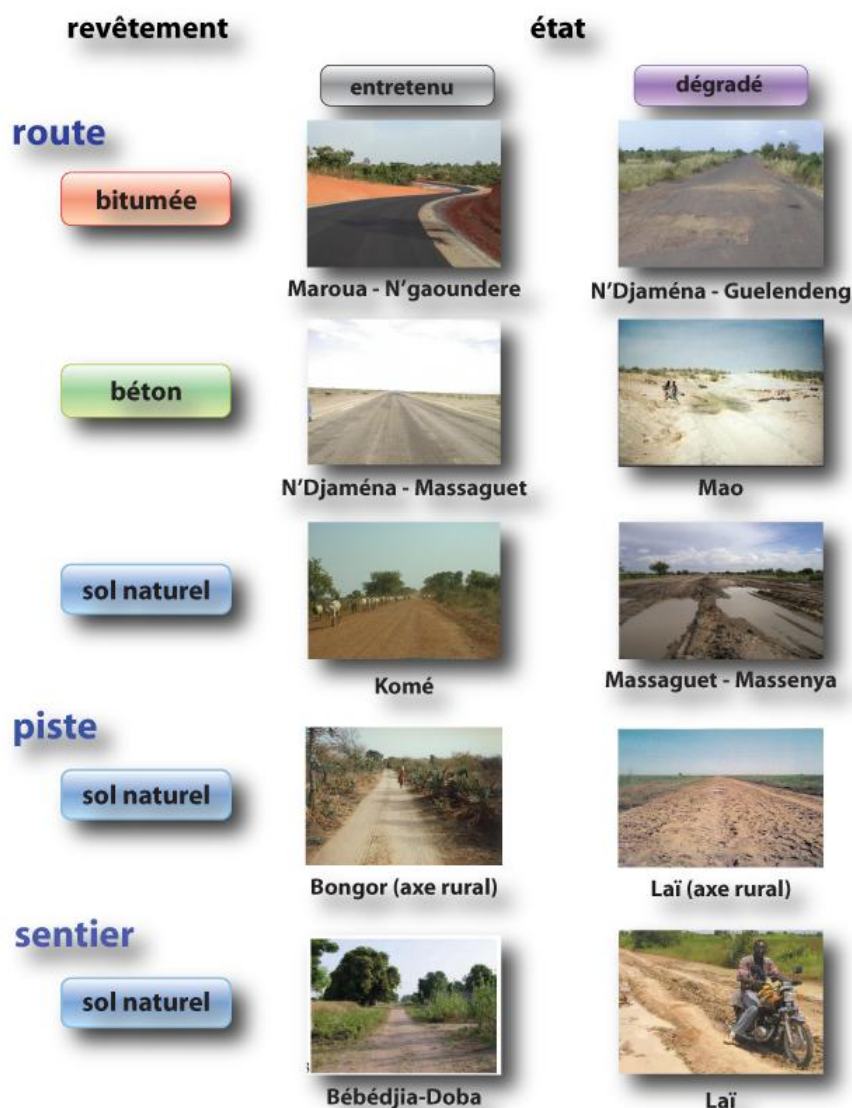


Figure 138 : Nomenclature du réseau routier, exemples de cas rencontrés au Tchad méridional

La route N'Djaména – Massaguet constitue l'unique route à revêtement bétonné en cours de réalisation. Le réseau bitumé se résume à un axe reliant N'Djaména à Doba. Les cartes routières (Michelin et IGN) représentent le réseau routier par deux classes de praticabilité (viabilité permanente, viabilité incertaine par temps de pluie) sous divisées en trois catégories de revêtement (revêtu, améliorée, sol naturel).

4.4.1.1.2. Géométrie et état du réseau routier au Tchad méridional

Le réseau routier du Tchad méridional compte environ 40 000 km (Gamar, 2006). La densité de ce réseau est très inégale : près de 90% ne concerne que la partie sud-ouest du Tchad, où se concentre la population. Selon notre nomenclature, elle se répartit en 6 200 km de routes, 18 000 km de pistes et 15 000 km de sentiers. Sur ce réseau, les routes bitumées et bétonnées ne représentent qu'une longueur totale d'environ 840 km (Gamar, 2006). La majorité de ce revêtement est dégradée, principalement sur des axes de réalisation antérieure à 2000 (axe N'Djaména – Guenleng – Bongor). De gros travaux de réalisation et d'aménagements d'axes routiers, ainsi que d'importants projets de réhabilitation, voient le jour depuis 2005 (Chasseigne, 2006 ; Groult, 2007) sous la poussée d'investissements étrangers (FAD, BFD, Banque mondiale, pays industrialisés).

Ces investissements ont pour objectif le désenclavement des régions agricoles, afin de développer les échanges de ressources issues de la production locale (Njoku, 2009). Les activités pétrolières de la région de Doba - Moundou ont également contribué à la création et à l'entretien d'une partie importante de ce réseau, depuis le démarrage des travaux en 2000.

La quasi totalité du réseau est sensible aux aléas climatiques. Ceux-ci sont responsables d'importants dégâts. En prévision des crues, les chantiers routiers mis en œuvre depuis 2003 équipent les axes majeurs bitumés (Kermer, 2004, Groult, 2007) : buses, surélévation des remblais, tranchées en béton, ponts en béton. Parallèlement, pendant toute la période de pluies, des barrières de pluies sont mises en place lorsqu'un axe est trop dégradé pour y autoriser la circulation, (Logistics Cluster Tchad, 2008 ; Figure 139).



Figure 139 : Exemples de prévision des risques liés à la dégradation des voies par les intempéries (par équipement des voies ou via des interdictions de circulation)

Axe Ngaoundere – Touboro – Moundou, à gauche, route de Kelo (région de Laï), à droite.

Les barrières de pluies fonctionnent durant toute la saison des pluies et sur tout le territoire tchadien. Il est possible de se renseigner par avance sur la réglementation de la circulation et sur la localisation exacte de ces barrières de pluies sur le web (logcluster.org). Cette information n'est cependant pas disponible sous forme cartographique.

L'eau est le facteur principal de dégradation du réseau, son action étant amplifiée par deux phénomènes connexes :

- **l'érosion des accotements et de la couche de forme.** Les fortes précipitations, ou « flash storm » se déclenchent très tôt dans la saison et provoquent un important ruissellement sur les sols très peu perméables. L'eau s'infiltre également dans les fissures de dessiccation et érode les sols. Des ravines se creusent le long ou au travers de la route, pouvant, en fonction de leur profondeur et de leur largeur, empêcher la circulation (Chasseigne, 2006). Nous avons considéré le seuil de 20 mm de pluie journalière critique pour le déclenchement de ce risque ;
- **le trafic.** La majorité des voies sont empruntées durant la saison des pluies. Ces circulations sur des sols mous occasionnent des orniérages importants qui se remplissent d'eau (Chasseigne, 2006). Ce type de dégât est observé sur toutes les routes reliant directement deux villages.

4.4.1.2. Indice de praticabilité et intégration du réseau routier à la cartographie de traficabilité

La praticabilité du réseau routier constitue un élément majeur du diagnostic de traficabilité. En saison sèche, l'emprunt d'un axe praticable sera privilégié par rapport à un itinéraire tout-terrain. En période de transition avec la saison des pluies, la praticabilité des routes est un facteur déterminant dans le choix de l'itinéraire. La démarche que nous avons mise en œuvre pour extraire l'occupation du sol spécifique nécessaire à la cartographie de la traficabilité, implique également que l'intégration du réseau routier respecte cette analyse.

4.4.1.2.1. Indice de praticabilité et cartographie de traficabilité à l'échelle régionale

Nous avons choisi de n'inclure dans le diagnostic de restitution cartographique de la traficabilité à l'échelle régionale que les axes majeurs (routes). Les pistes et sentiers parasitent l'interprétation à ce niveau de détail. De plus, la résolution trop grossière des sources d'imagerie Landsat et MODIS ne permet pas de détecter ces éléments.

Le réseau routier intervient dans la restitution cartographique régionale sous forme de vecteurs pour trois raisons :

- ce mode de représentation propose un support indépendant de celui de la traficabilité tout-terrain, ce qui est d'autant plus appréciable que les segments routiers ne deviennent pas obligatoirement impraticables en même temps que le sol environnant (Rousselin *et al.*, 2008). Accessoirement, le résultat de l'analyse de praticabilité du réseau routier peut ainsi se superposer à l'imagerie Google Earth ;
- les diverses techniques de détection de routes à partir d'imagerie satellite moyenne résolution (snakes, CBIR, morphologie mathématique, réseau de Kohonen, SOM) ont démontré de bonnes capacités à extraire la géométrie du réseau, mais, en aucun cas, le type de revêtement (Laptev, 1997; Klang, 1998; Zhang *et al.*, 1999; Peteri *et al.*, 2003; Molinier *et al.*, 2005) ;
- il est compatible des divers projets de recensement du réseau routier par la voie du web collaboratif et préserve donc l'avenir.

L'interaction du réseau routier et des précipitations est matérialisée par un arbre de décision dont le résultat est présenté sous la forme d'un indice de praticabilité. Il repose sur le lien de causalité entre les fortes précipitations et l'état et la nature de l'axe. Ce lien a été établi par des corrélations entre des observations photographiques datées, localisées et les informations cartographiques hebdomadaires fournies par l'organisme de logistique UNJLC durant la saison des pluies 2008. L'indice de praticabilité comporte trois classes de praticabilité graduelle ; impraticable, difficilement praticable, praticable. Cet indice est donc dynamique et évolue en fonction des précipitations (Figure 140, Figure 141).

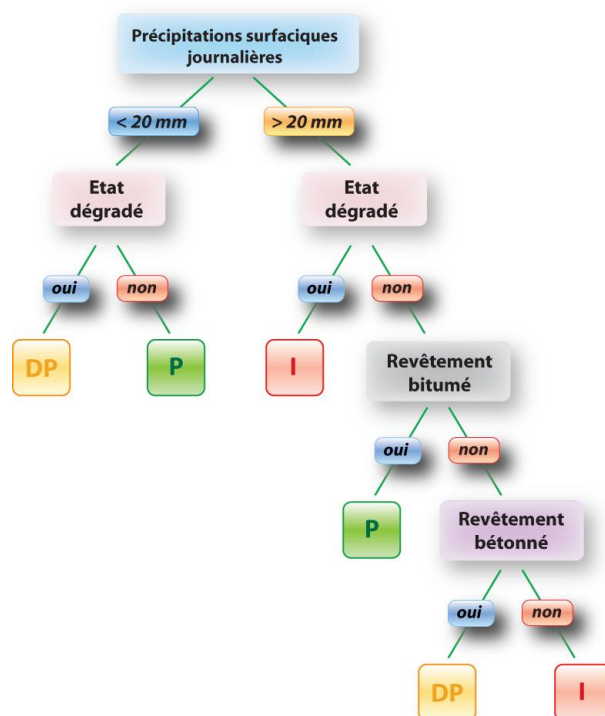


Figure 140 : Arbre de décision de l'indice de praticabilité

Cet arbre de décision repose sur l'interrogation des champs attributaires du réseau routier vectoriel, ainsi que sur le croisement de ce vecteur sur un fond raster de précipitations journalière. Il aboutit au renseignement de la praticabilité en trois classes : praticable (P), difficilement praticable (DP) et impraticable (I).

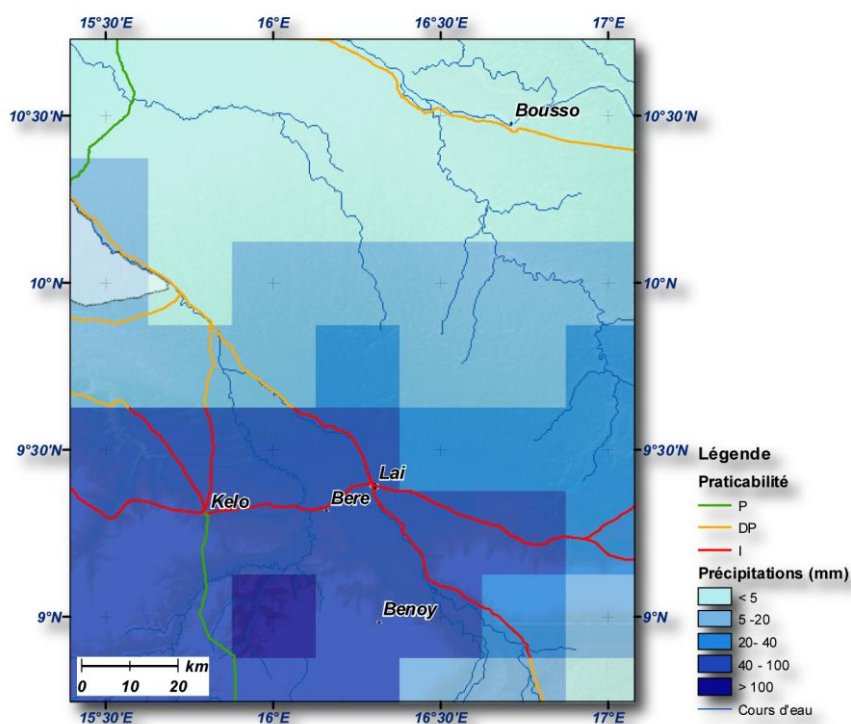


Figure 141 : Extrait de la praticabilité des routes pour le 1er octobre 2008 sur la région de Lai

Les valeurs des précipitations sont issues du capteur TRMM, estimées au pas de 3h, puis converties en valeurs journalières. La route au sud de Kelo est bitumée et entretenue, ce qui explique qu'elle reste praticable, malgré les fortes précipitations (>20mm). Les routes autour de Lai, Kélo et Moundou (plus au sud) sont toutes de même composition que le sol environnant et donc impraticables lors de ces fortes précipitations.

4.4.1.2.2. Intégration du réseau routier à la cartographie de traficabilité à l'échelle locale

La résolution de l'imagerie THR, sur laquelle repose notre cartographie de l'occupation du sol, est de 0,6 m. La largeur de chaque type d'axe est donc visuellement parfaitement appréciée. A l'échelle locale, nous restituons ce réseau sous forme raster. L'extraction est incluse dans le processus d'extraction de l'occupation du sol.

Le niveau de détail du diagnostic de traficabilité à l'échelle locale est limité par le seuil de reconnaissance des objets sur imagerie THR Quickbird. Nous avons établi qu'en dessous de 7x7 pixels, les objets de toutes formes observés sur ce type d'image étaient reconnus à moins de 50%, quel que soit l'algorithme employé.

Le réseau routier, assimilé à un ensemble de pixels, ne suit pas ce principe. L'intégration des caractéristiques de forme dans le processus de classification orientée objet distingue les routes des autres objets spectralement proches mais de propriétés géométriques différentes. Suite aux tests que nous avons menés sur les trois classes de réseau, et pour différents types de revêtements, nous sommes parvenus aux résultats de classification suivants (Figure 142, Figure 143) :

- les sentiers sont très difficilement identifiés. Généralement inférieurs à 3 pixels, ils sont spectralement confondus avec leur environnement ;
- les pistes, larges de 4 à 8 pixels, sont reconnues sur toute leur longueur, sauf dans les cas où les arbres masquent la route. Les pistes sont confondues avec le sol environnant s'il est de même nature ;
- les routes bétonnées et bitumées sont parfaitement identifiées et différenciées, même lorsque ces deux revêtements sont présents sur une même image. Elles sont larges de 8 à 12 pixels ;
- les dégradations des axes (ornières, tranchées, nids de poule, écaillage) ne sont pas détectées sur l'image.



Figure 142 : Détection des pistes et sentiers sur la région de Bol (Mayo Kebbi)

La piste en sol naturel est bien reconnue mais se confond spectralement avec les autres parcelles de sol nu. Les sentiers les plus fins, visibles à l'œil nu, ne sont pas reconnus. Ces sentiers ne sont généralement pas parcourus par des véhicules motorisés.



Figure 143 : Détection du revêtement d'une route à la sortie est de Massaguet

En appliquant le processus de traitement développé en partie 2, les deux types de revêtement, bitume (sombre et rouge) et béton (gris clair et bleu), sont très nettement identifiés. Ils ne sont pas confondus avec l'environnement (vert).

4.4.2. Cartes de traficabilité

La spatialisation de la traficabilité consiste à restituer, en chaque point de l'espace et à un instant donné, une information sur la capacité de la surface à supporter le passage d'un véhicule. Cette donnée est déduite de la mesure de résistance du sol en un point, par rapport à la pression exercée par le véhicule considéré. Sur le terrain, cette mesure est obtenue par une série d'essais géotechniques normalisés. Sa spatialisation requiert une connaissance de l'humidité et du comportement géotechnique du sol. Le diagnostic de traficabilité est ensuite exprimé par une nomenclature simplifiée, basée sur la cartographie des obstacles et les valeurs de résistance.

4.4.2.1. Restitution cartographique de l'humidité du sol

4.4.2.1.1. Humidité du sol à l'échelle régionale

L'estimation de l'humidité du sol est issue d'une modélisation complexe, faisant intervenir les transferts d'énergie entre l'atmosphère, la végétation et le sol, ainsi que les interactions entre les bassins hydrologiques et hydrogéologiques.

Les données d'humidité du modèle d'assimilation GLDAS sont fournies en temps réel toutes les trois heures. Bien qu'intégrant des données à 1 km de résolution, les sorties du modèle sont sous-échantillonnées et fournies à une résolution spatiale de 0,25° (Rodell *et al.*, 2004). Nous avons extrait les sorties intermédiaires de ce modèle, puis nous les avons sur-échantillonnées à 90 m par une fonction spline, dans les zones de faible relief, (plaines d'inondation du Logone, Salamat). Dans les régions accidentées (Ouaddaï, Guéra), ce sur-échantillonnage a été corrigé par l'intégration du Topographic Wetness Index dans la chaîne de traitement, calculé à partir du MNT SRTM. La résolution de 90m correspond à la résolution de la cartographie des sols réalisée à partir de l'imagerie Landsat.

L'humidité du sol calculée par le modèle est une humidité volumique, que nous avons convertie en humidité pondérale. Le poids volumique a été calculé en chaque point du sol, à partir de l'extraction sur imagerie Landsat des teneurs en argiles et sable (Figure 144).

L'analyse de traficabilité que nous avons développée est basée sur l'interprétation de données d'observations. Elle n'inclut donc pas la prédiction des précipitations, de l'humidité des sols ou des crues saisonnières, par ailleurs très mal appréhendées par les modèles actuels (Douville, 2004; D'Orgeval *et al.*, 2005; Boone *et al.*, 2006).

Le cycle hydrologique du Chari est conditionné par une alimentation liée à des affluents permanents et intermittents de débits très variables d'une année sur l'autre. Les connaissances sur la dynamique hydrologique du sous-bassin du Logone-Chari se sont raréfiées après 1979 alors que l'on assiste depuis à une évolution majeure du système avec l'assèchement rapide du Lac Tchad (Massuel, 2001; Sighomnou, 2003).

Enfin, toute la partie orientale du bassin versant est traversée par les oueds de l'Ouaddaï et du Salamat. Les méthodes classiques de calcul d'écoulement de surface (hydrographe unitaire sans dimension (DUH), Infinitesimal Runoff Coefficient) sont bien adaptées à la morphologie des oueds tchadiens (Sen, 2008), mais l'absence totale de mesures sur ces régions conduirait à des estimations peu concluantes.

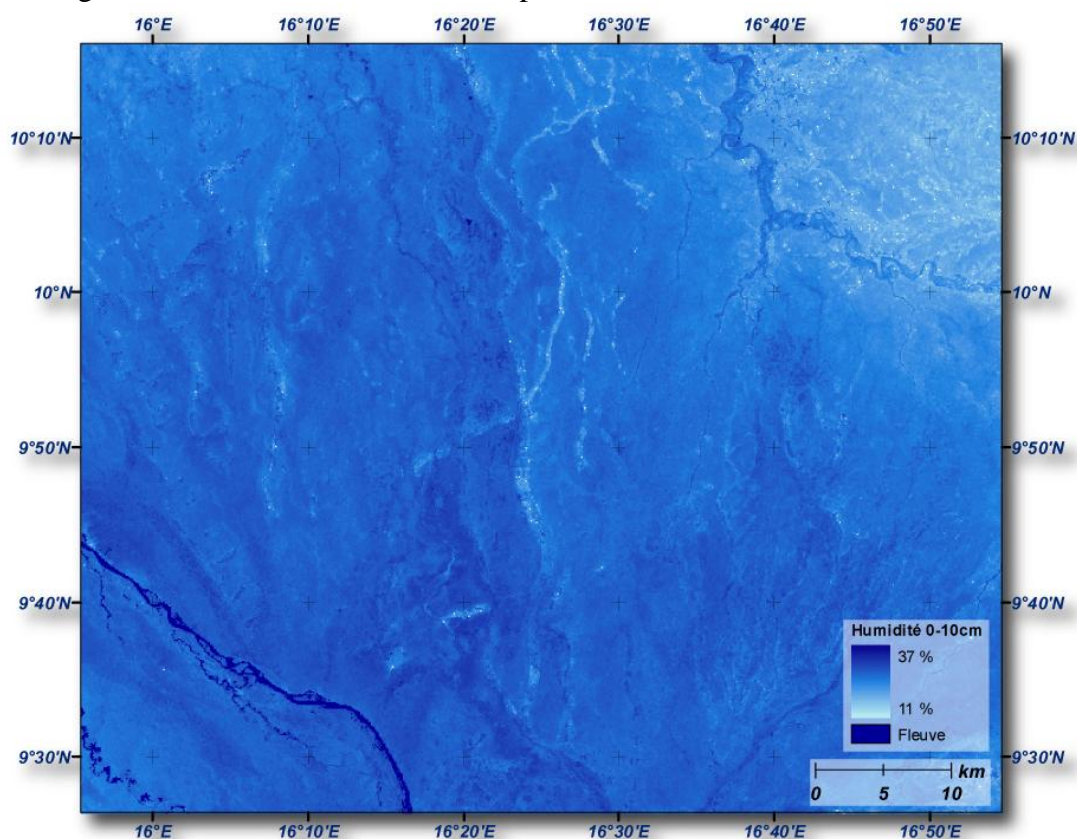


Figure 144 : Extrait de l'estimation de l'humidité sur la plaine d'inondation du Logone, au nord de Laï, au 11 octobre, à 18h.

Sur la plaine d'inondation du Logone, le produit d'humidité du sol est directement extrait des données du Land Surface Model NOAH, composant le modèle d'assimilation GLDAS (qui intègre 5 LSMs au total). Dans les régions de l'Ouaddaï, ces données sont corrigées par un Topographic Wetness Index (TWI) calibré sur les conditions de pluies, pour s'adapter au régime hydrologique particulier, régi par le rythme des précipitation et la topographie.

4.4.2.1.2. Humidité du sol à l'échelle locale

Nous avons démontré précédemment la capacité des capteurs radar THR à fournir une estimation de l'humidité des sols à l'échelle locale. Les résultats de ces estimations ne sont cependant appliqués qu'aux surfaces d'occupation du sol que nous avons consignées comme éligibles, soit les routes, les sols nus ou recouverts de végétation herbacée peu dense. Les autres surfaces sont considérées comme obstacles (végétation dense, arbres, marécages, eau, bâtiments).

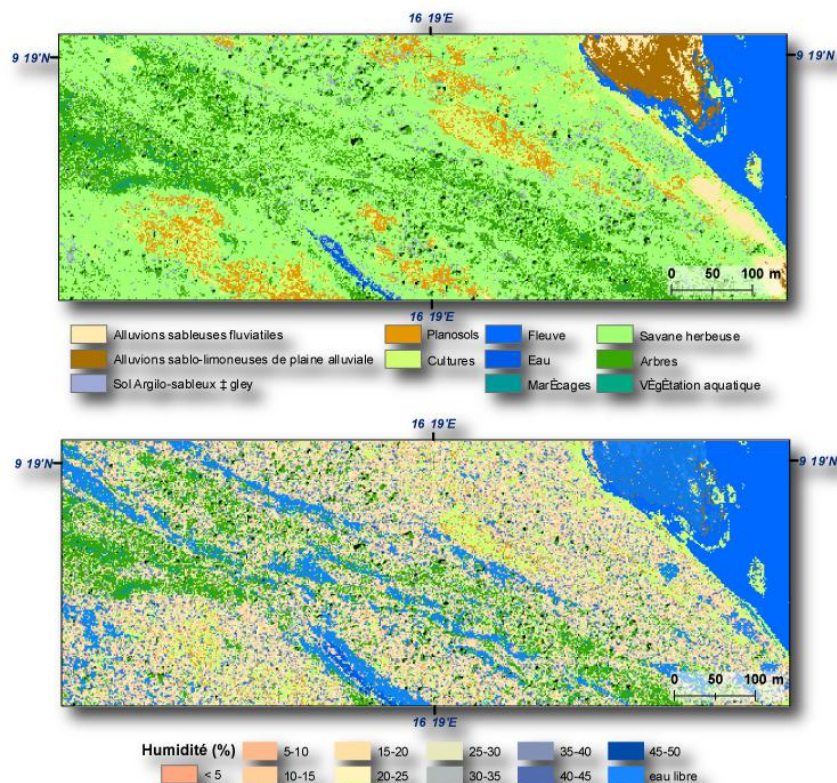


Figure 145 : Extrait de la superposition sélective des données d'occupation du sol extrait de l'imagerie Quickbird (en haut) et de l'humidité issues de l'imagerie THR radar (en bas). Sur cet extrait, nous avons dégagé, par imagerie optique, 11 classes d'occupation du sol, selon leurs propriétés spectrales. L'eau libre visible se limite au fleuve et à des étangs (oxbow lakes) connectés au fleuve. Certains fonds humides mais recouverts de végétation sont reconnus comme des parcelles marécageuses. L'imagerie radar nous a permis d'étendre les zones inondées, qui recouvrent les dunes fluviales, et se développent le long des terrasses alluviales.

4.4.2.2. Restitution cartographique de la traficabilité

4.4.2.2.1. Expression géomécanique des surfaces tout-terrain par la valeur de résistance à la pénétration au cône

La résistance à la pénétration au cône (ou Cone Index, CI) est une mesure de la résistance à la pénétration développée par le cône du pénétromètre à sa poussée dans le sol. Elle est égale à la force verticale appliquée sur l'appareil divisée par sa surface. Cette résistance est traditionnellement utilisée pour l'estimation de la traficabilité, dans le cadre des opérations militaires de logistique. Elle est alors obtenue à l'aide d'un essai au pénétromètre standard WES (USA Corps of Engineer Waterways Experimental Station).

Dans certaines conditions, la résistance exercée par le sol va être supérieure au poids du véhicule, ce qui va permettre à ce véhicule de circuler. Cette valeur critique de résistance est appelée Résistance à la pénétration au cône du véhicule, ou VCI (Vehicle Cone Index). Son équation est donnée par la formule de Maclaurin (1997) et validée par les travaux de Hetherington (2001) et Saarilathi (2003) :

$$VCI = \frac{1,85.W}{2n.b^{0,8}.d^{0,8}.\delta}$$

avec :

- W , le poids total du véhicule (kN)
- n , le nombre d'essieux
- b , la largeur des pneus avant chargement (m)
- d , le diamètre des pneus avant chargement (m)
- δ , la réfraction des pneus après chargement (m)

Les valeurs de VCI d'un véhicule léger de type 4x4 sont de l'ordre de 180 kPa et de 1100 kPa pour un camion de tonnage moyen.

La résistance du sol dépend de la nature et des conditions d'humidité du sol. A partir de plus de 1000 essais de terrain et de laboratoire, Frankenstein et Koenig (2004) de l'U.S. Army Corps of Engineers ont établi une relation quantitative entre la valeur à la pénétration au cône et l'humidité pondérale. Cette relation est donnée pour chaque type de sol (selon la classification LPC/USCS), à l'exception des sols graveleux. L'équation générale s'écrit :

$$CI = e^{(c_1 - c_2 \ln(\omega))}$$

avec :

- c_1 et c_2 , sont donné dans la table 15
- ω , la teneur en eau pondérale du sol (%)

Classe LPC	C1	C2
Ap	10,998	-1,848
At	14,816	-3,583
SA	11,056	-1,356
Sm-Sb	3,487	0,815

Tableau 15 : Coefficients C1 et C2 pour les différentes classes de sols LPC/USCS

Les valeurs de coefficients ne sont données que pour les quatre types de sols rencontrés sur la zone d'étude

A partir de ces équations, il est possible de tracer la relation entre ces deux paramètres sous forme d'abaques (Figure 146). A chaque point de l'espace, renseignés par une valeur d'humidité pondérale et appartenant à une classe des sols déduite de l'interprétation de l'imagerie Landsat, est donc associée une valeur quantitative de résistance à la pénétration au sol, en kPa. Cette valeur exclut pour l'instant les effets de la végétation sur le renforcement de la cohésion du sol.

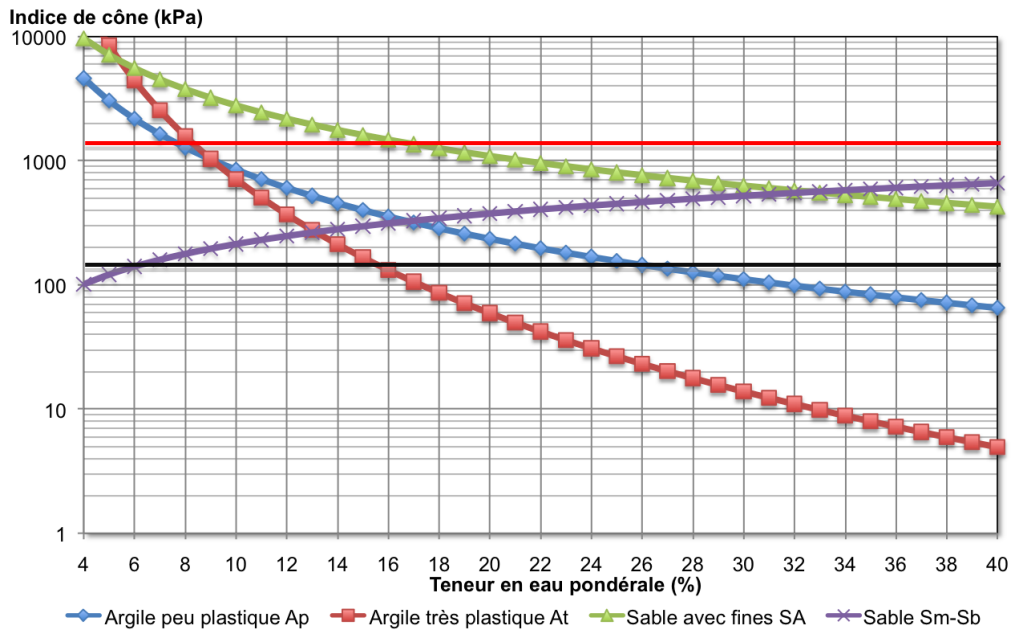


Figure 146 : Abaques de valeurs de résistance à la pénétration au cône, en fonction de la teneur en eau pondérale

Les traits représentent les valeurs de résistance des véhicules, noir pour un véhicule léger 4 roues motrices, et rouge pour un camion de tonnage moyen.

4.4.2.2.2. Intégration de la densité racinaire pour la mesure de traficabilité

La présence de racines dans le sol a pour effet d'augmenter sa cohésion, augmentant ainsi sa résistance à l'enfoncement. Nous modélisons ce gain de résistance par une addition par rapport à la cohésion matricielle du sol. La relation entre cohésion et résistance à la pénétration au cône est ensuite établie à partir de la théorie de force portante des pieux (Cassan, 1978).

Les racines végétales interagissent avec le sol en produisant un matériau composite dans lequel les racines sont les fibres d'un réseau résistant à la traction et une matrice, faiblement résistante (Faisal *et al.*, 2007). Des études comparatives sur différents écosystèmes ont mis en évidence l'importance des fines racines (de 1 à 20 mm de diamètre) et de la densité linéaire des racines dans le renforcement du sol (O'Loughlin, 1984; Normaniza *et al.*, 2006). La densité linéaire est maximale sur l'intervalle 0-20 cm, pour lequel elle est équivalente à la densité de biomasse racinaire (Zutter *et al.*, 1999).

L'expression de la cohésion fonction de la densité de racine n'est connue que pour les plantes herbacées. Elle est décrite par Tengbeh (1989) par une relation exponentielle, à partir de parcelles d'ivraie. Ce résultat est validé par les travaux de Faisal *et al.* (2007), menées sur d'autres espèces végétales herbacées (Vétiver). Elle s'écrit :

$$C = 10,94 + 9,2\log DR$$

Le pénétromètre est un pieu en modèle réduit. La théorie de force portante des pieux peut donc s'appliquer à l'essai de pénétration statique (Cassan, 1978). Elle apporte ainsi la relation entre la cohésion et la résistance à la pénétration au cône. La contrainte de rupture à la base d'un pieu est donnée par la relation :

$$CI = \gamma . D . N_q + C . N_c$$

avec

N_q et N_c sont les facteurs de portance, fonction de l'angle de frottement interne,
 γ est la densité du sol,
 D est la profondeur (m)
 C la cohésion

Sur cette équation, le terme de pointe apparaît comme une fonction linéaire de la profondeur. Un graphique expérimental à l'avancement de l'essai permet de déterminer la pente de la droite γN_q et d'en déduire l'angle de frottement interne ϕ . L'origine des abscisses est théoriquement égale à $C N_c$, d'où l'on peut calculer la cohésion, maintenant que ϕ est connu.

Les essais au pénétromètre étant généralement menés dans des terrains argileux ou argilo-sableux, nous ne tiendront compte que des sols pour lesquels le frottement interne est très faible voire nul. Dans le cas des argiles purement cohérentes, la relation entre cohésion et résistance à la pénétration au cône (Cassan, 1978) s'écrit :

$$CI = C . N_c + p_0$$

avec :

N_c le facteur de portance de la cohésion C
 p_0 , la contrainte effective verticale au niveau de la pointe ($p_0 = \Sigma \gamma D$)

Le facteur N_c s'obtient à partir de la théorie du poinçonnement continu dans le sable, par application du théorème des états correspondant de Caquot (Caquot *et al.*, 1966). Les auteurs s'accordent pour admettre la valeur $N_c = 10$ (Skempton, 1953; L'Herminier, 1967; Cassan, 1978). Les travaux de Manuwa (2007) valident cette relation à partir d'essais in situ et de laboratoire réalisés sur les sols tropicaux argileux et argilo-limoneux nigériens (Figure 147).

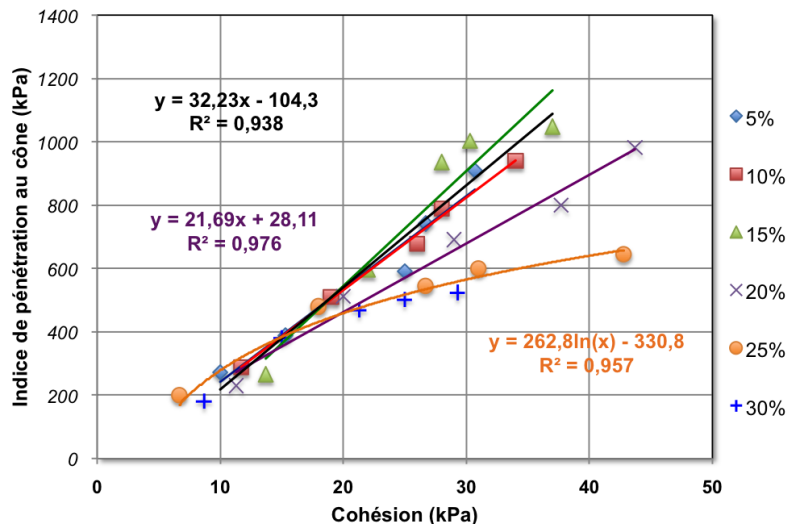


Figure 147 : Corrélation entre Cohésion du sol et valeur de résistance à la pénétration au cône, pour les sols argileux et argilo-limoneux, pour différentes classes d'humidité.

La relation entre la cohésion et l'indice de pénétration au cône varie en fonction de l'humidité des sols. Les essais de Manuwa ont montré qu'à de fortes valeurs d'humidité, l'augmentation de la cohésion n'est plus linéairement corrélée avec la pénétration du cône. Nous avons donc relié ces deux variables par trois équations, selon trois classes d'humidité : inférieure à 17,5%, de 17,5 à 22,5%, supérieure à 22,5%.

L'augmentation de résistance à la pénétration au cône liée à la végétation est calculée pour les valeurs de densité racinaire exprimées tous les 16 jours à partir des produits MODIS, et des estimations d'humidité trihoraire. Elle correspond à une résistance additionnelle de l'ordre de 10 kPa pour les mois de janvier à mars, pour lesquels la densité racinaire est comprise entre 65 et 80 g/m³, et peut atteindre 450 kPa au milieu de la saison des pluies, au pic de croissance de la végétation (Figure 148).

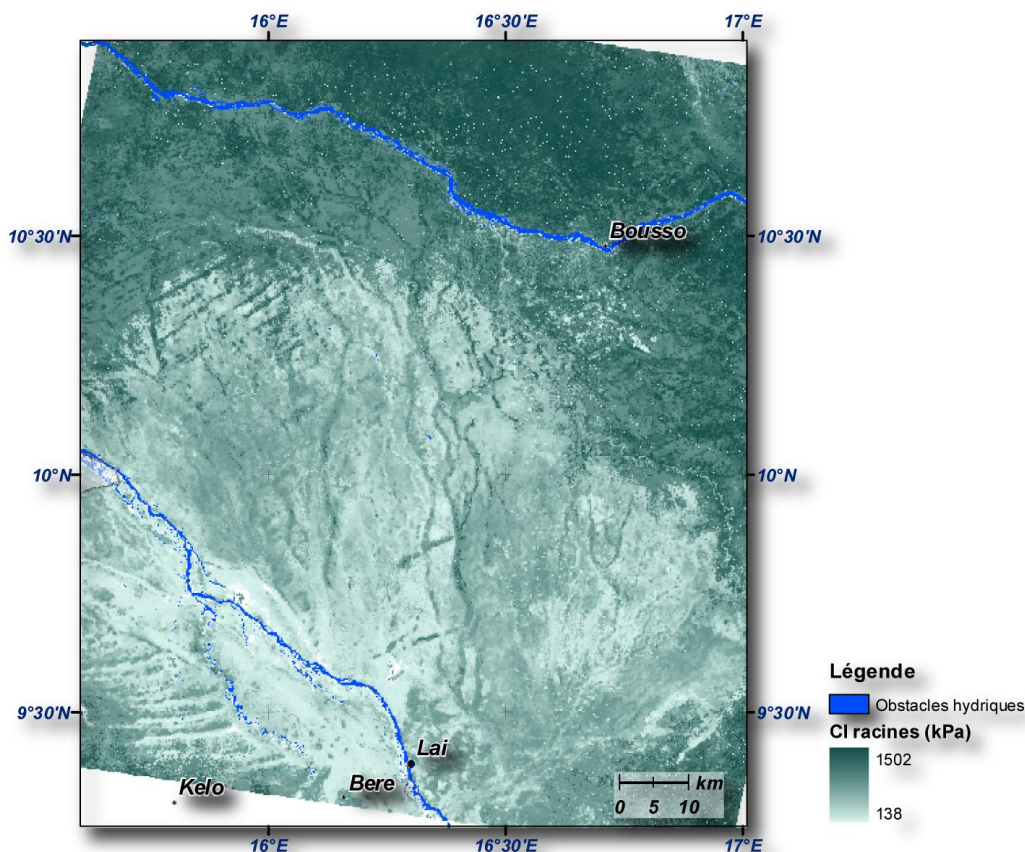


Figure 148 : Restitution cartographique de la résistance à la pénétration au cône induite par la densité racinaire, au 2 août 2008.

Le centre de la plaine affiche de faibles valeurs de résistance, en raison d'une densité racinaire moyenne et d'une forte humidité (supérieure à 25%). Les buttes exondées présentes au Nord de Bousso bénéficient au contraire d'une forte densité racinaire et d'une humidité pondérale moyenne (de l'ordre de 15%).

Notre modèle de restitution à l'échelle locale ne permet pas de déduire une valeur de densité racinaire (il faudrait pour cela travailler avec les 4 canaux originels Quickbird). La densité de végétation est donc évaluée directement par photo-interprétation. Nous considérons alors une valeur moyenne pour les surfaces interprétées en tant que sol (la végétation étant un obstacle) comprise entre 10 kPa en saison sèche et 300 kPa en saison humide.

4.4.2.3. Conclusions

A partir de la restitution cartographique de la valeur de résistance à la pénétration au cône, de la praticabilité des routes et de la représentation des obstacles, nous présentons une carte de traficabilité spécifique d'un véhicule et à une date donnée. La sémiologie de la carte de traficabilité finale à l'échelle régionale synthétise l'occupation du sol dynamique en trois couleurs (Figure 149).

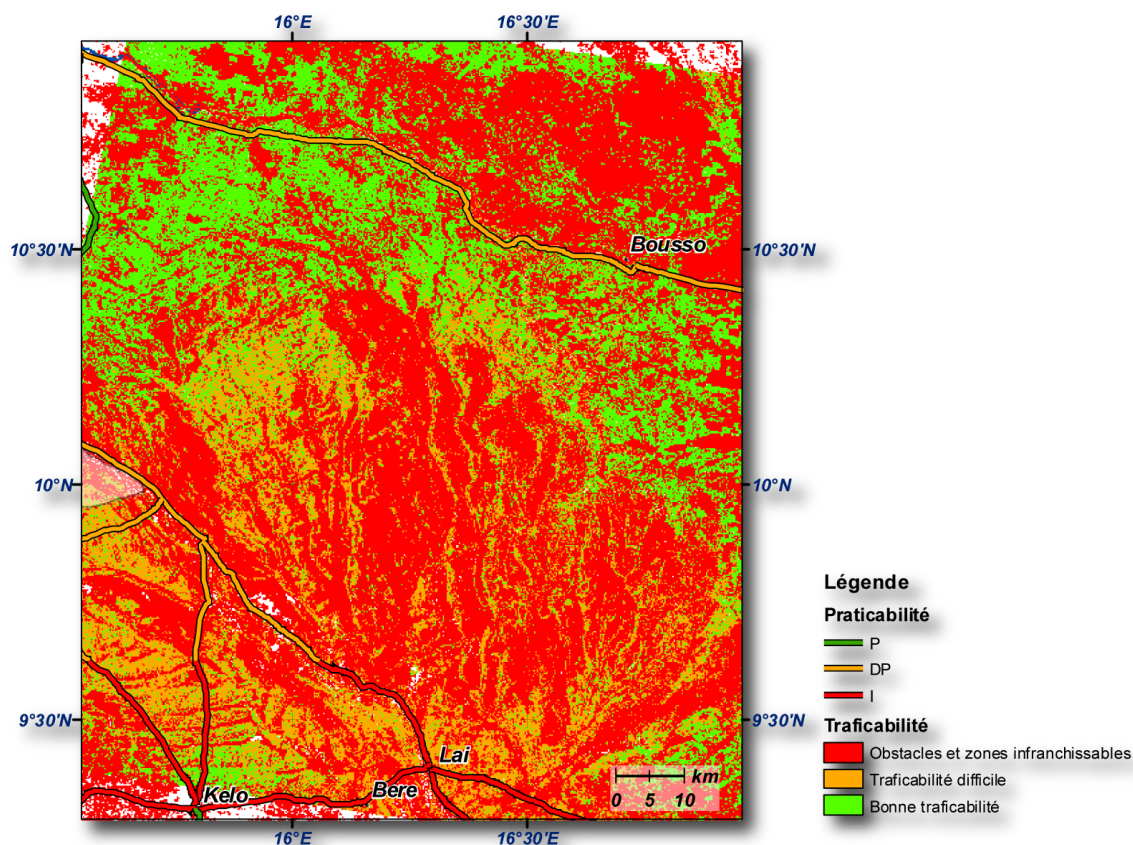


Figure 149 : Extrait de la carte de traficabilité pour le 2 août 2008, 18h, pour un véhicule exerçant une pression de 1082 kPa (camion de tonnage moyen)

Cette restitution synthétise toutes les étapes précédentes. En rouge, les obstacles, arborés, herbacés, hydriques et urbains, ainsi que les zones de valeur de résistance au cône inférieure à 1082 kPa. Les surfaces (sol+végétation) de résistance comprise entre 1082 et 1352 kPa sont en orange. Les zones vertes affichent une résistance supérieure à 1352 kPa. La praticabilité des routes à cette date est mauvaise, à l'exception de l'axe Guelendeng - Bongor (à gauche de la carte), bitumé et en bon état. Les zones blanches sont sans information (en dehors de l'image ou dont hors des seuils de calcul)

Afin de démontrer la portée de cette analyse à l'ensemble du territoire du Tchad méridional, nous avons reproduit le processus dans les régions d'Adré (Figure 150 et Figure 151), et dans le centre du Salamat (Figure 152 et Figure 153). Chacune de ces deux régions est représentative d'un type de paysage. Certaines orientations que nous avons développées ont été modulées par la présence de certains types de surfaces, sans remettre en question la validité de l'analyse.

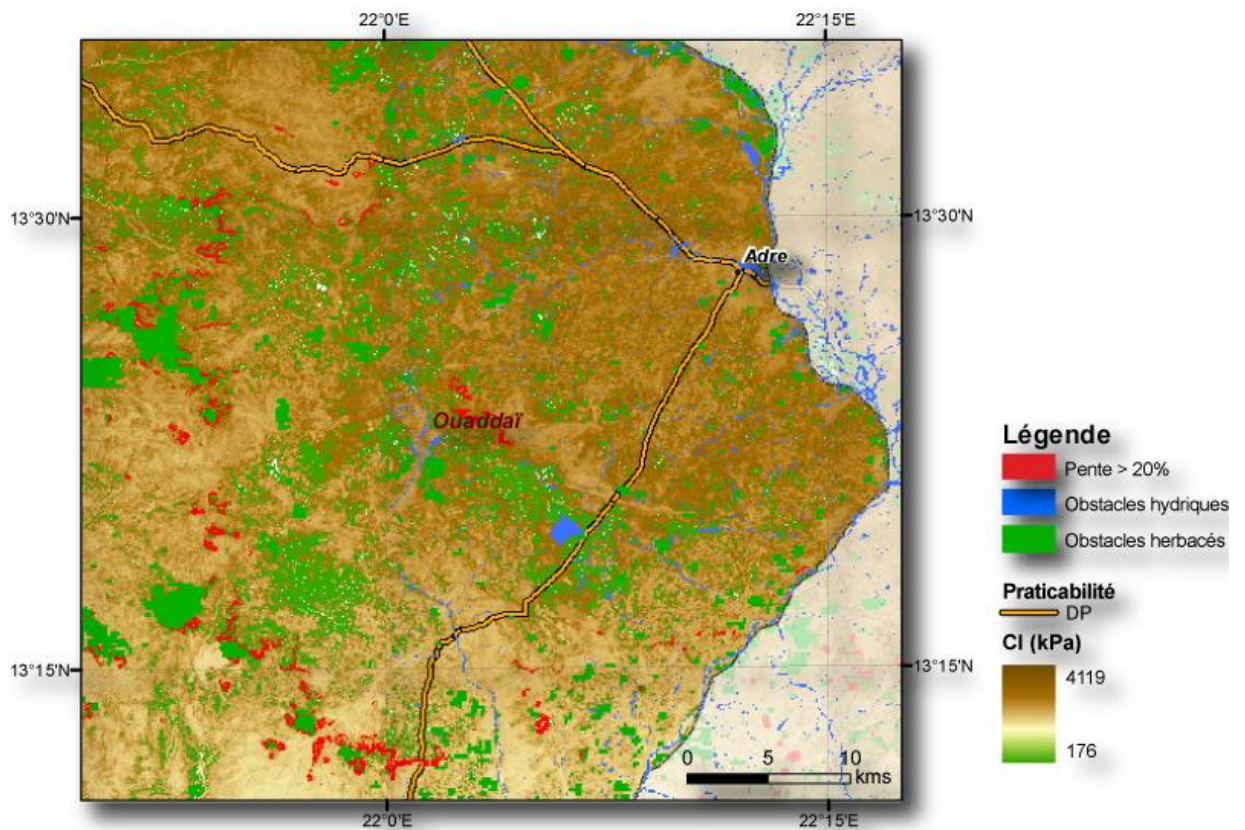


Figure 150 : Restitution cartographique de la résistance du sol, de la praticabilité des routes et des obstacles, pour la région d'Adré, au 6 septembre 2008

Les plateaux de l'Ouaddaï sont parsemés de pitons rocheux, nombreux mais de petite taille (<200m de diamètre), qui constituent un type d'obstacle permanent. La résolution du MNT SRTM ne permet pas de tous les isoler, et le degré de pente n'est pas suffisamment important pour constituer un obstacle. En revanche, ces pitons ont une teinte particulière, et on peut les extraire efficacement à partir d'un seuillage sur une composition 4/7 Landsat. Par ailleurs, la région étant traversée par des oueds, aucune barrière hydrique n'est visible sur les images Landsat ou Quickbird. Nous avons alors corrigé les estimations du modèle GLDAS avec l'indice d'humidité topographique (TWI). A la date du 6 septembre, les oueds importants sont figurés ainsi comme des obstacles.

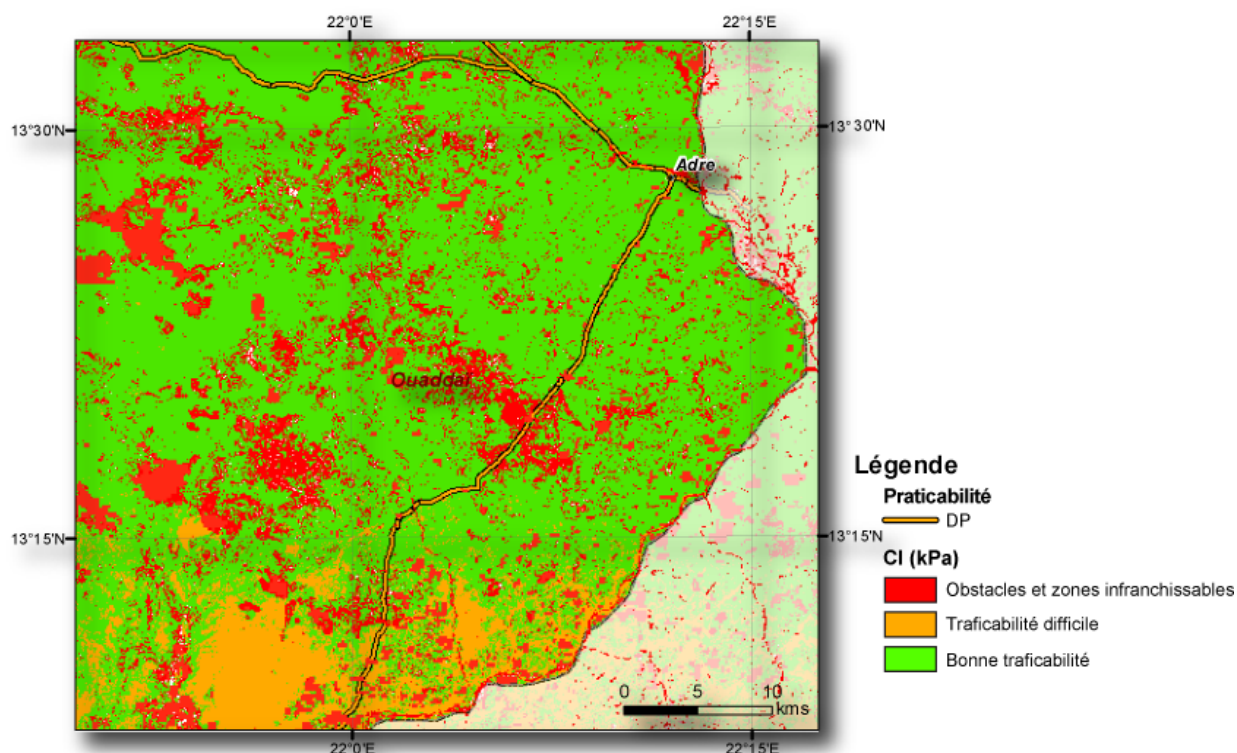


Figure 151 : Extrait de la carte de traficabilité du 6 septembre, pour un véhicule exerçant une charge de 1082 kPa, région d'Adré

Au 6 septembre 2008, la région n'a pas connu de précipitation depuis 3 jours. La praticabilité des routes constituées de sols est nu est donc difficile. La majorité des surfaces présentent une bonne traficabilité en raison d'une humidité des sols faible et de la nature sableuse du terrain. La végétation ne constitue que des taches éparées.

Les analyses de traficabilité de la plaine de Laï et de la région d'Adré ont été complétées par une étude d'un secteur oriental du Salamat, situé entre Sarh, Am Timan et la frontière centrafricaine. Cette région possède la particularité d'être très peu habitée et dépourvue de routes majeures. La problématique de traficabilité se concentre ainsi sur une circulation tout-terrain.

Cette région est parcourue par un oued important, le Bahr Keita, affluent du Chari. L'agriculture pastorale est dominante, bien que peu observée dans la zone ciblée. En revanche, ces terres sont des territoires de chasse et d'élevage, et les conséquences de ces manifestations sont visibles localement par imagerie THR (sols brûlés, tracés laissés par des passages d'animaux). La couverture végétale évolue d'une savane arbustive à buissons épars en saison sèche à une savane herbacée dense en saison humide.

Nous disposons pour cette zone d'une image radar TerraSAR-X bipolarisée datée du 5 septembre 2008. Les mesures de traficabilité ont donc été évaluées pour ce jour, pour deux échelles de restitution.

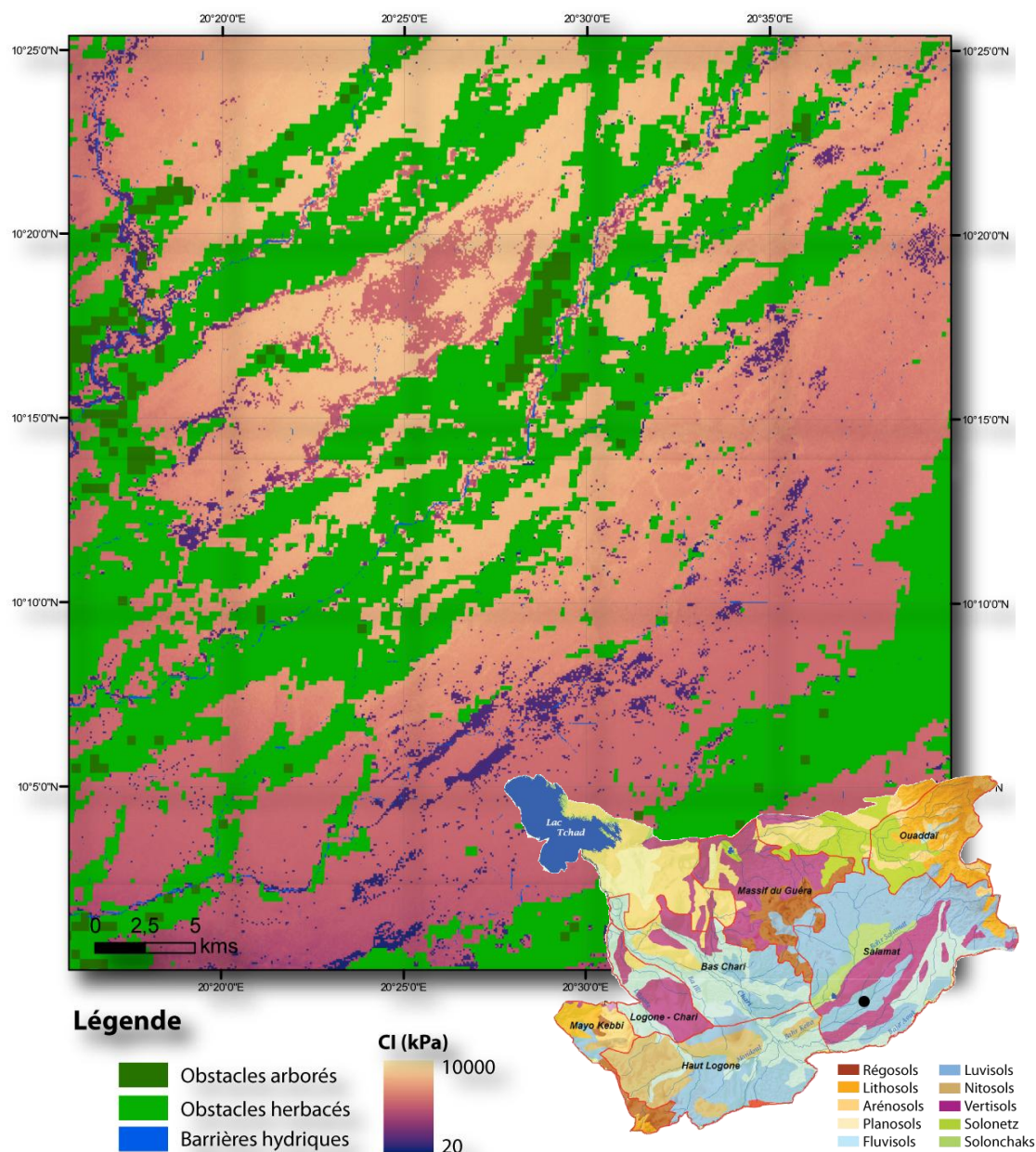


Figure 152 : Carte de résistance à la pénétration au sol et obstacles, région orientale du Salamat, au 5 septembre 2008

La méthode de reconnaissance des types de sols développée au chapitre 4.1 a été appliquée ici pour différencier les sols fluviatiles, les vertisols et sol ferrugineux. Les grandes zones argileuses identifiées par imagerie sont recouvertes en saison humide par une végétation herbacée et n'apparaissent donc pas sur cette restitution au 250 000^e. Ces terrains sont recouverts temporairement par l'eau. Les sols ferrugineux sablo-argileux sont peu humides. Les pluies de mousson se sont arrêtées au 25 août.

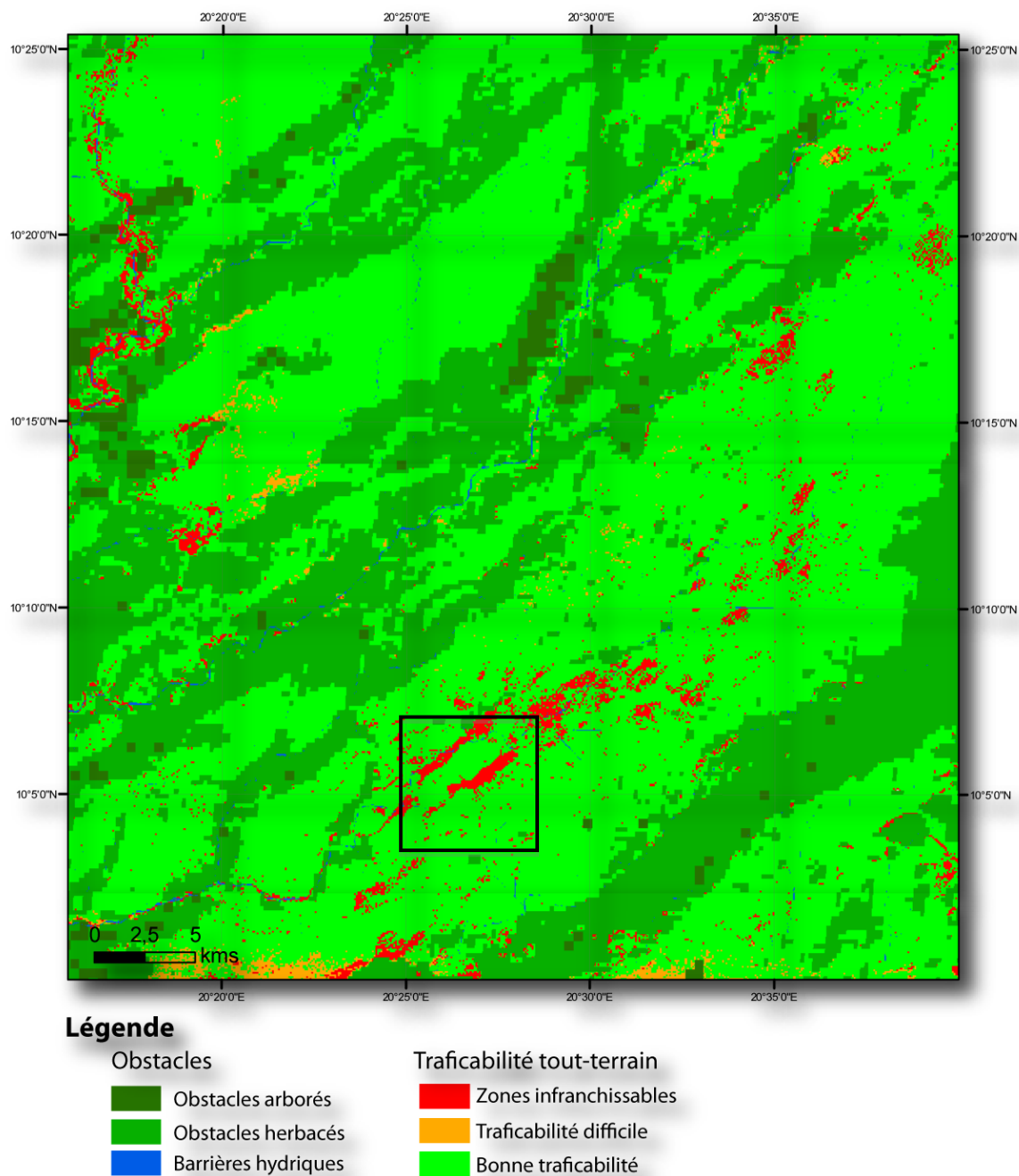
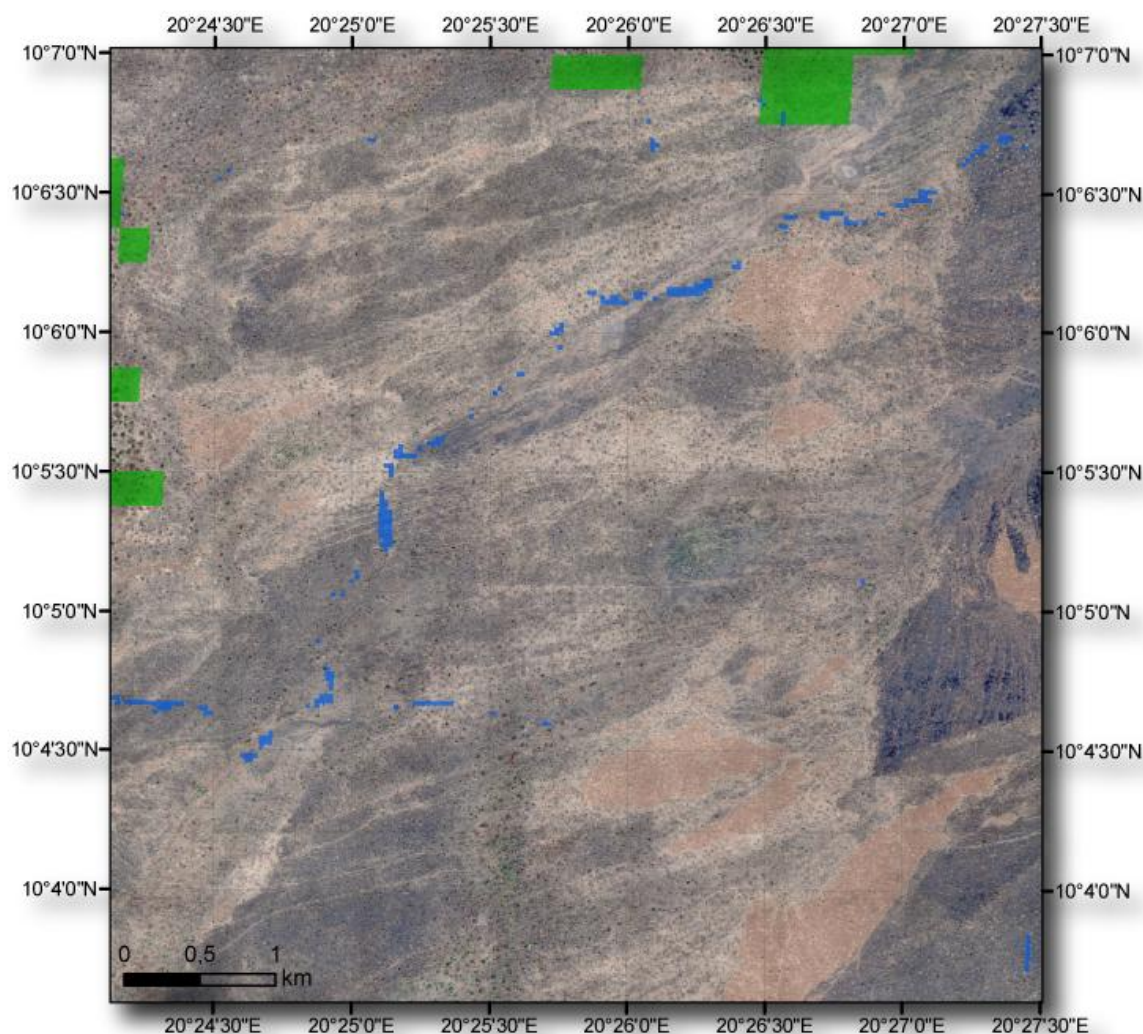


Figure 153 : Diagnostic de traficabilité, region orientale du Salamat, au 5 septembre 2008, pour un véhicule de transport de troupes (VCI=1082 kPa)

A la date du 5 septembre 2008, le diagnostic de traficabilité présente cette zone plutôt favorable à une circulation tout-terrain. Nous avons mené une interprétation à l'échelle locale (rectangle noir), dans le but de confirmer ces observations et de préciser le diagnostic (Figures 170, 171 et 172).



Légende

- Obstacles herbacés
- Barrières hydriques

Figure 154 : Image Quickbird issue de Google Earth, zone orientale du Salamat
 Nous avons superposé les interprétations obtenues par imagerie basse et moyenne résolution sur cette image THR Quickbird datée du 17 février 2006. Les zones herbacées se retrouvent d'une échelle à l'autre, bien qu'elles soient plus éparées sur imagerie Quickbird (saison sèche). En revanche, le cours d'eau est absent, et remet en question la fiabilité de l'interprétation à moyenne échelle. Enfin, la modification du paysage entre saison sèche et saison humide est telle qu'il est très difficile de reconnaître les classes d'occupation du sol identifiées par l'image radar du 5 septembre 2008. Les sols ferrugineux apparaissent en ocre sur l'image et les zones sableuses fluviales en gris bleuté. Les zones bleu-violetées sont caractéristiques de brûlis.

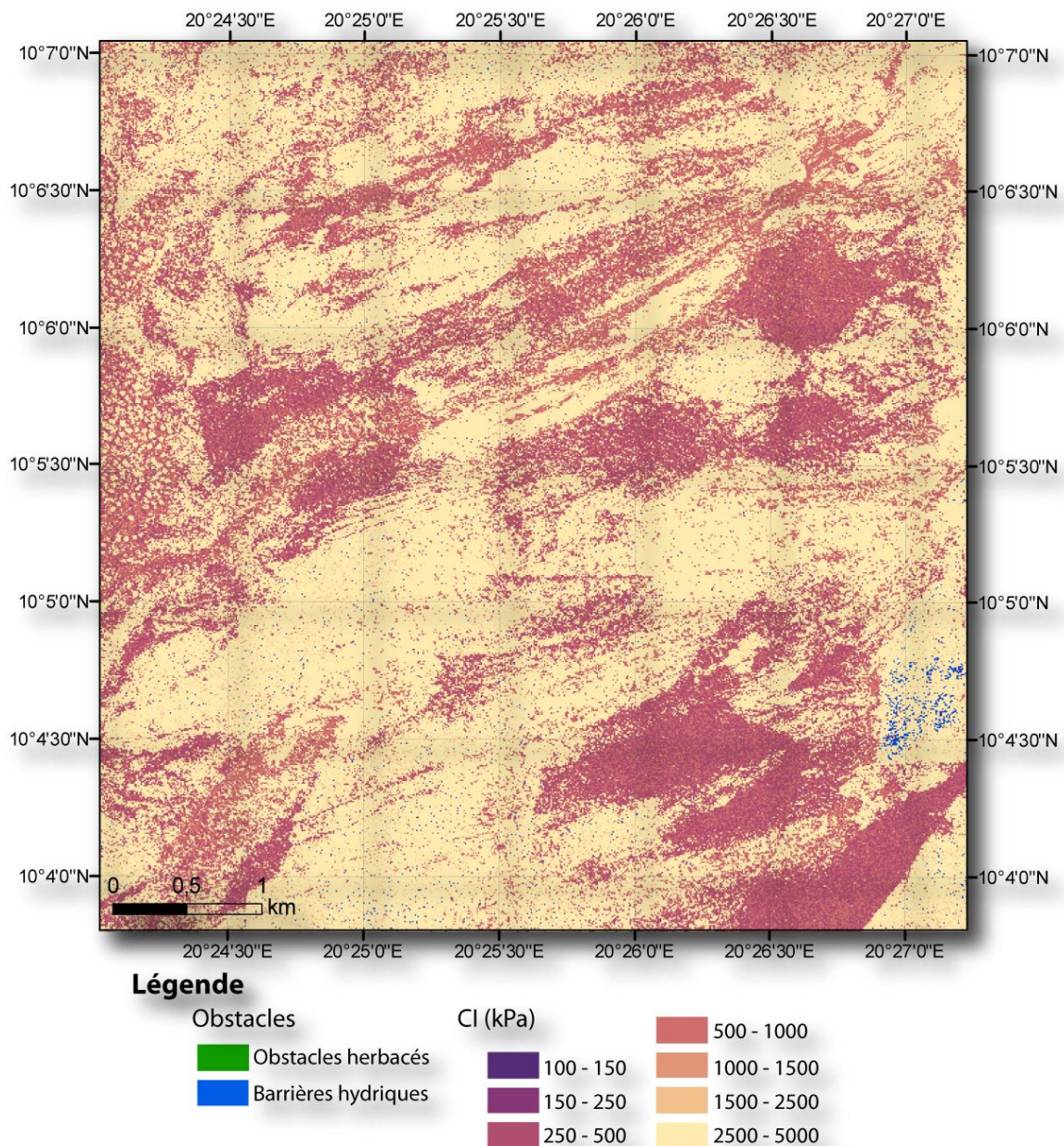


Figure 155 : Carte de résistance à la pénétration au cône, à l'échelle locale, zone orientale du Salamat

L'extraction de l'occupation du sol par imagerie THR n'a requis qu'un type de classification (SVM). Cette interprétation prend en compte l'occupation du sol depuis une imagerie optique de saison sèche et l'humidité extraite de l'image radar du 5 septembre. Elle conduit cependant à une restitution erronée. En effet, les zones argileuses ne sont pas reconnues par classification (confusion spectrale) et se comportent donc comme des sols sablo-argileux peu humide. Par ailleurs, les zones végétalisées sont également absentes. Nous avons donc introduit les éléments de l'occupation du sol identifiés par imagerie radar pour corriger cette interprétation (figure 172).

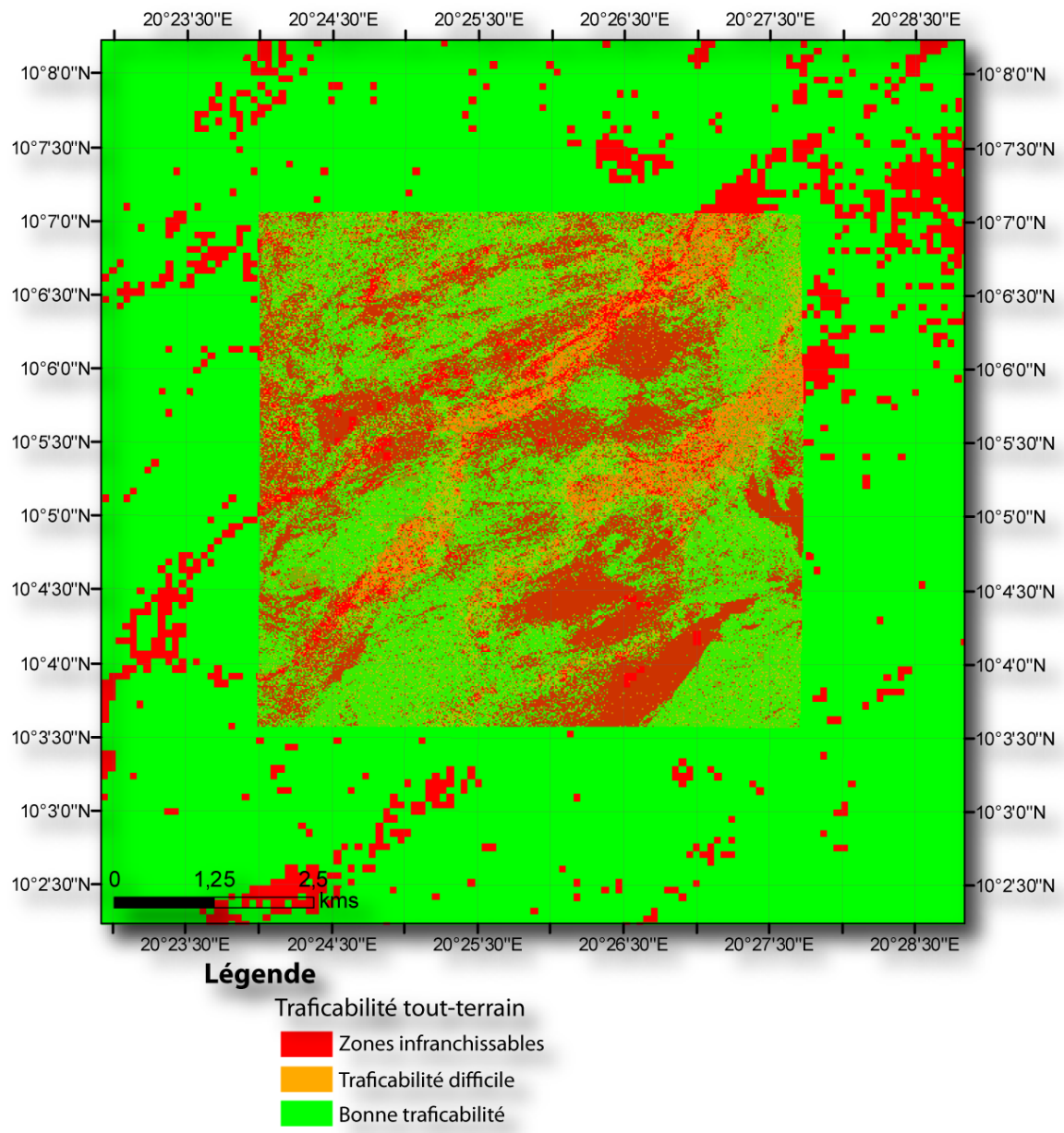


Figure 156 : Diagnostic de traficabilité tout-terrain pour un camion de tonnage moyen (1082 kPa), au 5 septembre 2008

En restituant l'interprétation de l'occupation du sol obtenu par imagerie radar, les mêmes zones à risques se retrouvent d'une échelle à l'autre (en orange pour l'échelle locale et en rouge pour l'échelle régionale). Les zones végétalisées, extraites de l'imagerie optique THR (arbres) et de l'imagerie radar THR (zones arbustives) sont affichées en rouge.

4.5. Synthèse

Ce chapitre a proposé une méthode de restitution cartographique de la traficabilité à partir de capteurs satellitaires, aux échelles régionales et locales :

Elle se décompose en quatre étapes importantes :

- A l'échelle régionale, la cartographie des sols est réalisée à partir d'une combinaison de trois indices spectraux, puis déduite de classe pédologique. La densité racinaire renforce la cohésion des sols, et par conséquent augmente la résistance de pénétration au cône. Nous avons extrait cette densité de l'indice de végétation EVI du capteur MODIS, calculée tous les 16 jours. De ces deux estimations, nous avons calculé une résistance de pénétration au cône (sol + racine) dynamique, fonction de l'humidité pondérale des sols.
- A l'échelle régionale, chaque type d'obstacle est extrait séparément. Les obstacles liés à la croissance de la végétation sont extraits par seuillage de l'indice dynamique EVI MODIS à la valeur de 5000. Les zones urbaines sont discriminées par classification (maximum de vraisemblance). Les obstacles hydriques sont extraits par seuillage du rapport 4/3 du capteur Landsat.
- A l'échelle locale, l'occupation du sol est extraite par combinaison sélective des meilleurs résultats des classifications orientées objet et SVM des archives Quickbird Google Earth. Nous avons validé la qualité de l'interprétation issue de ces images à partir d'une série de tests radiométriques, géométriques et sémantiques.
- Le capteur radar THR TerraSAR-X a démontré une bonne sensibilité à l'humidité des sols en polarisation HH. Les zones potentielles de conversion du signal en valeur d'humidité sont toutefois limitées aux régions non ou très peu végétalisées de sols non labourés. Le mode d'acquisition Spotlight permet de détecter les routes et pistes empruntées ou non en saison des pluies.

Les résultats de ces analyses sont concluants et la méthode a démontré son adaptabilité sur différents types de paysage du Tchad méridional. Cependant, cette étude repose sur des images d'archives, et il existe un risque pour que le paysage ait été modifié depuis la date de prise de vue. Par ailleurs, les bases de connaissance pédologiques et routières du modèle sont constituées à partir de données ouvertes. L'évolution des technologies Internet et de la disponibilité de l'information entre 2006 et 2009 a pu avoir un impact sur la méthodologie de recherche de sources ouvertes dans notre travail. Par extension, l'émergence de nouveaux services sera peut-être en mesure de remettre en cause notre approche de la restitution de la traficabilité par imagerie spatiale. Enfin, le modèle restera-t-il robuste en dehors des limites du territoire tchadien ? Ces points sont discutés au chapitre suivant.

Synthèse de la recherche et perspectives

Nous avons développé dans ce travail une méthode de production de diagnostics de traficabilité, en zone tropicale, à partir de sources d'imagerie multispectrales et radar, et de données en sources ouvertes. Cette démarche a été appliquée à plusieurs environnements du Tchad méridional puis qualifiée par plusieurs séries de tests et de contrôles.

Chaque analyse a requis une ou plusieurs adaptations, selon la période d'acquisition des images et les terrains observés. Nous en avons déduit les atouts et les limites du modèle.

Ce chapitre propose une synthèse de l'étude, en restituant les points forts, les faiblesses et les voies d'améliorations du développement méthodologique. Ce développement est ensuite appliqué sur une autre région tropicale africaine (région du Katanga, au Sud de la République Démocratique du Congo) afin d'évaluer sa portée. Enfin, nous présentons les perspectives opérationnelles et scientifiques de ce travail.

5.1. Synthèse

Les résultats du développement méthodologique produit sur plusieurs types de paysage du Tchad méridional et à plusieurs échelles, ont conforté certaines des orientations prises. Ils ont également mis en évidence certaines limites, et voies d'améliorations possibles.

5.1.1. *Résumé des atouts du modèle*

5.1.1.1. Orientations méthodologiques

5.1.1.1.1. Restitution multi-échelle

Pour les zones tropicales, nous avons proposé une restitution cartographique de la mesure de traficabilité multi-échelle, plus efficace pour apporter une aide à la décision qu'une échelle unique.

Sur le territoire du Tchad méridional, les obstacles à contourner occupent des surfaces parfois très étendues (zones inondées ou humides) et justifient une représentation du diagnostic à petite échelle (de l'ordre du 250 000^e). Le choix d'un nouvel itinéraire de détournement est alors pris très en amont, parfois plusieurs centaines de kilomètres. On traite à la même échelle de décision les cas pour lesquels la route initiale ne peut pas être empruntée pour des raisons diverses (barrière de pluie, mines, portion de route très dégradée, zone de troubles, ...).

Par ailleurs, les retours d'expérience des acteurs humanitaires et militaires intervenant dans l'Ouaddaï nous ont appris que la présence ou l'absence d'un radier était souvent déterminante dans le choix d'un itinéraire. L'identification de ces objets par imagerie n'est possible qu'avec des capteurs à Très Haute Résolution (Quickbird, Worldview).

5.1.1.1.2. Mise à jour et formulation des diagnostics

La structure du modèle permet une actualisation rapide et automatisée de la mesure de traficabilité en segmentant les processus de traitement. La mise à jour, qui se résume à trois processus, est alors isolée de l'interprétation de l'occupation du sol statique :

- le **calcul de résistance à la pénétration au cône** est effectué par un traitement des données d'humidité du sol GLDAS et des produits de végétation MODIS. Il permet de produire des cartes rapidement (jusqu'à 8 par jour), pour suivre l'évolution saisonnière et journalière des conditions de praticabilité du sol (Figure 157) ;
- la **carte des obstacles de végétation** permet de suivre la croissance puis le retrait de la végétation, par un seuillage des données MODIS produites tous les 16 jours. Cette mise à jour est importante car elle est toujours légèrement en décalage avec le flux de mousson ;
- l'**état de praticabilité des axes** est produit par l'intersection des estimations surfaciques de précipitations avec les caractéristiques d'état et de revêtement du réseau routier. Ce traitement simple permet de disposer d'un support de décision mis à jour quotidiennement ;

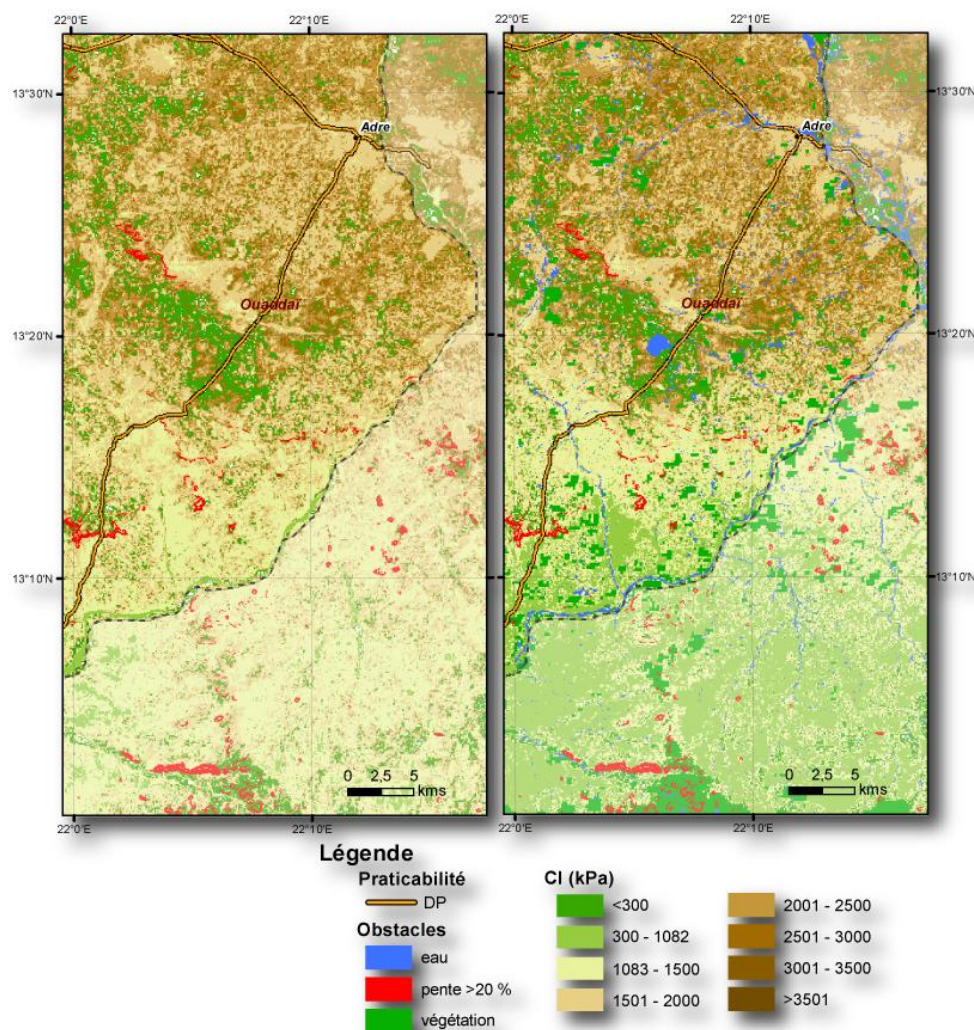


Figure 157 : Evolution saisonnière des valeurs de résistance à la pénétration au cône, au 2 mars (à gauche) et 6 septembre 2008 (à droite) , région d'Adré.

La perte de résistance entre mars et septembre est notable dans la partie sud de la carte. Elle s'explique par une forte augmentation (14 à 31%) de l'humidité du sol dans cette zone, alors que vers Adré, l'évolution de l'humidité a été plus modérée (12 à 17%). Les zones de très faible résistance de la carte de mars (en vert) sont des zones de sables purs (estimés > 98%). La végétation n'apparaît qu'avec l'arrivée des précipitations.

Le diagnostic de traficabilité tout-terrain est établi en fonction de la résistance à la pénétration au cône et de la mobilité d'un véhicule. Il est donc formulé pour un véhicule spécifique. En reprenant le calcul de mobilité développé dans la plupart des modèles opérationnels (DTSS américain, Eichrodt, 2003 et Gumos, 2005), sur la base de la pression que le véhicule exerce sur le sol, il est possible de produire très rapidement des cartes de traficabilité adaptées aux caractéristiques du véhicule considéré (Figure 158). Ce calcul simple n'a pas l'ambition de reproduire le comportement de mobilité du véhicule, mais de fournir par un critère technique un premier diagnostic d'aide à la décision.

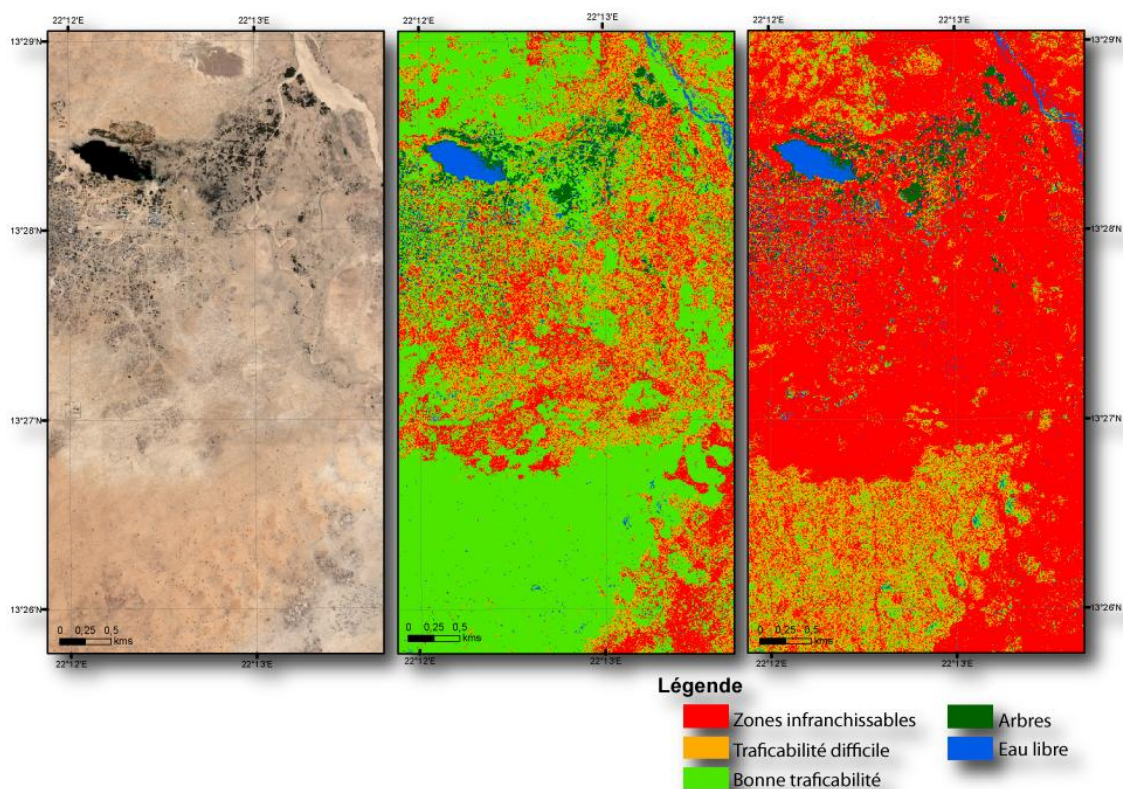


Figure 158 : Diagnostics de traficabilité pour un véhicule léger 4x4 (au centre) et pour un camion de tonnage moyen (à droite), comparé à une composition colorée Quickbird, Adré

Ces diagnostics locaux ont été réalisés pour le 6 septembre 2008, à partir des données Quickbird pour l'occupation du sol et radar pour l'humidité et les zones inondées. On peut remarquer qu'au 6 septembre, soit 3 jours après le retrait de la mousson sur cette zone, le lac d'Adré n'était pas plus étendu qu'en pleine saison sèche. Pour le 4x4, qui exerce une pression de 120 kPa, seuls les sols argileux sont infranchissables. En revanche, le camion (1200 kPa) ne peut circuler que sur les aires sableuses.

5.1.1.2. Apport des données en sources ouvertes pour le développement méthodologique

Le développement méthodologique s'appuie largement sur les données disponibles en sources ouvertes. Elles permettent de produire des diagnostics à coût réduit (notamment au niveau de l'acquisition des sources d'images), mais également de calibrer l'imagerie satellitaire et de qualifier les résultats. Ainsi :

- l'**imagerie Quickbird Google Earth** a fourni une interprétation de l'occupation du sol de qualité équivalente à celle issue de l'imagerie originale (cf ch. 4.2) et a qualifié les interprétations issues de Landsat en apportant une vérité terrain ;
- les **cartes pédologiques d'archive** de l'IRD ont apporté des descriptions et analyses physico-chimiques de plus de 250 échantillons de sol. C'est à partir de ces informations que les corrélations entre les classifications pédologiques et la nomenclature géotechnique LPC/USCS, puis avec l'imagerie Landsat, ont été établies ;
- les **sources ouvertes documentaires** (photos, textes,...) ont été utilisées pour mettre à jour les attributs des axes routiers.

5.1.1.3. Apport des données radar THR

Dans le cadre de ce travail de thèse, la sensibilité du capteur TerraSAR-X à l'humidité du sol a été testée pour différentes configurations de polarisation et de résolution et sur plusieurs dates et secteurs géographiques. A partir d'une polarisation HH, et pour une résolution spotlight et stripmap (1 à 6m), une restitution cartographique de l'humidité des sols a été produite. Elle ne s'applique toutefois que sur les surfaces de sols nus, non labourés.

Par ailleurs, dans son mode de résolution le plus fin, la caractérisation de la praticabilité des routes a été mise en évidence. Les sentiers ne sont pas détectés.

5.1.2. Faiblesses et limites du modèle

Le modèle de traficabilité développé n'est pas exempt de défaut, et certaines orientations techniques mises en place dans cette approche peuvent être discutées.

Les sources d'imagerie optique utilisées dans ce travail ont fait l'objet de nombreux travaux ayant abouti à des résultats opérationnels transposables pour plusieurs de nos thématiques. En revanche, le capteur TerraSAR-X est très récent, et n'a été que très peu étudié pour son potentiel de restitution de l'humidité. En l'absence de travaux exploitables en bande X et de mesure de terrain, nous nous sommes appuyés sur les corrélations proposées par Le Hégarat-Masclé *et al.*, (2002), établies pour un signal en bande C, dont les propriétés ne sont pas exactement similaires. Nous avons pu bénéficier d'un grand nombre d'images, mais toutes n'étaient pas exploitables (les images antérieures à juillet 2008 ne respectent pas les spécifications qualité de l'opérateur), et ne correspondaient pas forcément à une configuration optimale pour caractériser la sensibilité du signal face aux variations d'humidité du sol. Les résultats obtenus et les conclusions tirées doivent donc être vues comme une première approche du problème, à approfondir par des travaux à réaliser sur les images nominales désormais proposées en routine par les opérateurs InfoTerra (TerraSAR-X) ou e-Geos (Cosmo-Skymed)

Par ailleurs, l'intégration des sources ouvertes dans le développement méthodologique génère un risque qu'il faut maîtriser. Ce risque concerne la fiabilité de ces sources. Par exemple, à l'exception des prises de vue MODIS, les images utilisées dans le modèle sont des archives (Landsat et Quickbird). Il existe alors un risque pour que l'état actuel du paysage ne corresponde pas tout à fait à ce qui est observé sur l'image.

Enfin, la plupart des sources locales sont liées au contexte (la source est placée là où il y a quelque chose à observer). Des solutions alternatives doivent être trouvées, dans le cas où la disponibilité de ces sources ne serait pas optimale.

5.1.2.1. Fiabilité des sources d'imagerie Landsat et Quickbird

5.1.2.1.1. Risques associés à l'utilisation des images d'archive Landsat

Parmi les sources d'images du modèle, les archives du capteur Landsat constituent la base de notre analyse régionale. Ces images ont été acquises il y a en moyenne 10 ans. Le risque associé à cette obsolescence théorique sur le diagnostic de traficabilité est directement lié à l'évolution de l'occupation du sol pendant ce laps de temps. Sur la totalité du territoire méridional, cette évolution n'est toutefois observée que très localement. Elle est liée à l'anthropisation de la région qui se manifeste sous deux aspects :

- la **croissance démographique** des zones urbaines et les migrations de populations (réfugiés, nomades). Nous avons mesuré une augmentation de la superficie de la capitale, N'Djamena, entre 2001 et 2003, de 10,7 %. Elle correspond aux estimations du CERVALD (2009), soit 25% de croissance entre 2000 et 2006. Nous avons également observé cette évolution pour les grandes villes de l'Ouadaï (Adré, Abéché). La superficie des villes extraite par classification est donc globalement sous-estimée. Nous n'avons pas tenu compte de cette expansion ;
- le développement des **installations de production et d'acheminement du pétrole** a occasionné de nombreux travaux d'aménagement routier autour des lieux de production (Ekobena, 2008) : rehaussement de routes, digues, accotements, réhabilitations. Les archives Landsat sont antérieures à ces installations. En omettant de signaler ces modifications, elles apportent alors une information erronée (Figure 159). Ces aménagements ne sont réalisés que dans des secteurs clés très localisés. Au Tchad, après le bassin de Doba, elles se localisent autour du lac Tchad (Diffa), dans la zone sud du Salamat, à l'ouest de Bongor et sur le point triple Cameroun-Tchad-Centrafric (IHS Energy, 2008). Une bonne connaissance des zones de prospections et des contraintes géopolitiques majeures du pays est un préalable nécessaire pour l'anticipation du risque lié au développement de ces installations ;

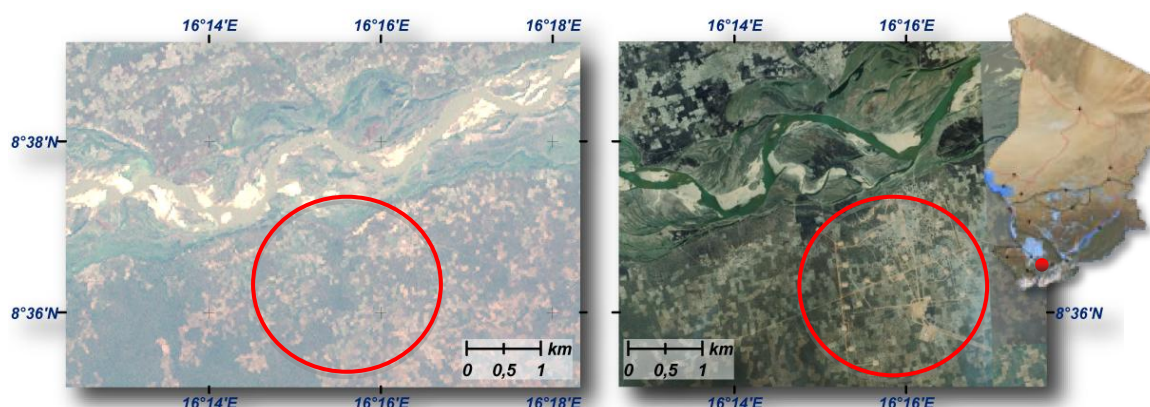


Figure 159 : Comparaison du site pétrolier de Mboki sur imagerie Landsat du 26 novembre 1999 (à gauche) et sur imagerie Quickbird du 24 novembre 2006.

Le site de Mboki est un exemple de risque d'utilisation des images d'archives. Il correspond à une des installations du site de Komé, l'exploitation pétrolière majeure du Tchad. Il est situé à 20 km à l'est de Moundou et fonctionne depuis 2003. Il s'étale sur plus 900 ha de routes, puits de forage, stockages, etc. L'impact de ce genre de site pour la traficabilité est considérable : terrassements, construction et entretien de routes d'accès, d'aérodrome.

5.1.2.1.2. Risques associés à l'utilisation de l'imagerie Quickbird Google Earth

Les images THR du serveur Google Earth sont des archives, au même titre que les images Landsat. Les conséquences de leur utilisation sur le diagnostic de traficabilité sont donc identiques, à une échelle locale :

- le contrôle qualité de l'imagerie Landsat par imagerie THR Quickbird devient erroné : le dimensionnement de l'analyse semble correct mais peut être dû à un faible écart de dates entre deux archives ;
- l'intérêt de l'interprétation de l'occupation du sol locale est alors perdu car elle n'est plus à jour (Figure 160).

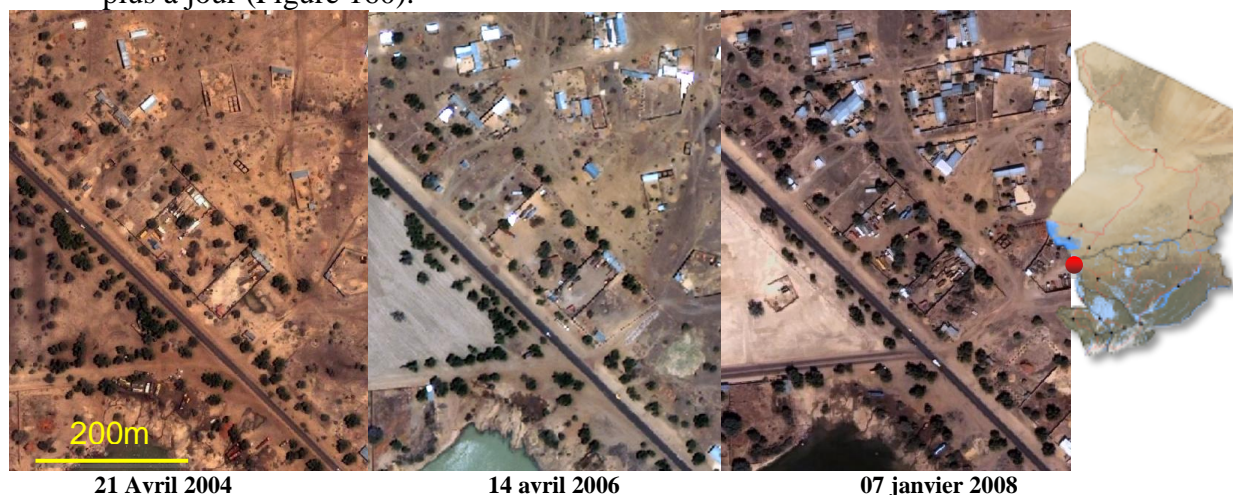


Figure 160 : Evolution du nord de l'agglomération de N'Djaména observée par les mises à jour successives de l'imagerie Quickbird issue de Google Earth

Ce secteur du nord de N'Djaména est représentatif de l'évolution urbaine de la capitale. L'aménagement de la voirie n'accompagne cependant pas la densification des zones d'habitations et les secteurs sensibles aux inondations sont plus nombreux en 2008 qu'en 2004. En observant la transformation de ce quartier, il apparaît évident qu'une analyse construite sur une des anciennes images apporte une information erronée. Sur Google Earth 5, il est possible d'accéder à l'historique de toutes les images diffusées superposées, et ainsi de contrôler cette évolution de l'urbanisation.

Ce risque est toutefois variable. Les archives Quickbird de Google Earth sont plus souvent mises à jour sur les villes et agglomérations, sites où les problèmes de traficabilité sont les plus sensibles. Les prises de vue sur les villes du sud-ouest du Tchad ont toutes été mises à jour au moins une fois et jusqu'à quatre fois (2004, 2006, 2007 et 2008) pour N'djaména.

5.1.2.2. Fiabilité des sources ouvertes documentaires

5.1.2.2.1. Risques sur l'utilisation de cartographie pédologique d'archive

La structure du modèle de traficabilité est conçue pour fournir au minimum un diagnostic à l'échelle régionale, quelles que soient les données disponibles. Cependant, la restitution des types de sol s'appuie sur une description pédologique qui, sur la zone d'étude, a été réalisée dans les années 60. Le risque de baser l'interprétation sur ces données a été estimé à travers trois séries d'observations. L'écart de dates important entre les travaux de terrain pédologiques et nos observations implique trois types d'évolutions et de risques associés :

- **dans quelle mesure l'évolution des connaissances pédologiques impacte-elle les descriptions des sols et leur nomenclature ?** La principale évolution dans la systématique des sols concerne l'adoption d'une classification internationale, la World Reference Base for Soil Resources, en 1998 (FAO, 1998; FAO, 2006). Les démarches scientifiques des référentiels morphogénétiques d'Aubert (1965) et la WRB sont très semblables (Duchaufour, 2001) et prennent comme base le processus évolutif des sols, dans la mesure où il est très étroitement lié aux conditions du milieu (Jamagne & Boulaine, 2004). Leurs divergences portent sur la mise en œuvre de ce principe : les propriétés des horizons de la WRB sont décrites par des valeurs seuils (Batjes, 2003), alors que la taxonomie Aubert prend en compte les caractères morpho-analytiques du profil dans son ensemble.

Dans la pratique, les sols tropicaux regroupent 5 types de processus (vertisolisation, ferruginisation, ferrallitisation, planosolisation et salinisation), dont les correspondances entre ces deux classifications sont généralement directes. Ce risque est donc minime ;

- **quelle a été l'évolution des paysages et l'écart entre le paysage actuel et cartographié est-il important ?** Le réchauffement climatique est le facteur principal de l'évolution du paysage tchadien depuis les années 60. Ses conséquences s'observent sur le paysage tchadien par le raccourcissement de la saison des pluies. Dans la région des plaines du Chari et du Logone, les sols hydromorphes et vertisols sont toujours recouverts d'eau temporairement, et à l'exception du lac Tchad, le raccourcissement de la saison n'a pas d'impact régional visible sur les conditions pédogénétiques ;
- **quel est le risque lié à l'extrapolation des cartes ou à l'utilisation d'une information moins bien résolue ?** Les travaux de globalisation des cartes pédologiques ont abouti en 2008 à la production d'une carte harmonisée à l'échelle mondiale (Harmonized World Soil Map, HWSM (Nachtergaele, Van Velthuizen, & Verelst, 2008). Elle partitionne les terres émergées en 15000 unités cartographiques de sols, classées selon la nomenclature WRB (Batjes, 2006), sur lesquelles sont dérivés une douzaine de paramètres physico-chimiques. Elle est diffusée au format raster d'une résolution de 1 km sous licence FAO, et disponible en téléchargement pour usage personnel et scientifique depuis septembre 2008. Elle représente la meilleure alternative lorsqu'aucune carte régionale n'est récupérable. Cependant, dans la pratique ces informations sont difficiles à corréler avec l'imagerie satellitaire Landsat.

5.1.2.2.2. Evaluation de la fiabilité des sources ouvertes

L'origine des sources ouvertes est très dépendante de l'actualité et du contexte géographique (site touristique, région riche en matière première, zone agricole,...). La question de leur fiabilité constitue la principale hésitation à leur intégration dans les processus systémiques, parce qu'il n'existe aucun moyen fonctionnel de garantir leur traçabilité. La recherche d'informations dans le contexte de traçabilité concerne un thème et un lieu précis. Notre travail n'avait pas pour objectif central de développer une méthode de qualification des sources ouvertes. Mais nous avons néanmoins appliqué une méthode en trois points pour éviter la dispersion de la recherche et réduire l'incertitude quant à la véracité de l'information récupérée. Elle consiste en :

- une recherche systématique de la provenance d'origine de l'information en limitant les interprétations successives. Les rapports journalistiques sur la réalisation d'aménagements routiers tchadiens sont souvent issus de la propagande locale. En remontant au texte des bailleurs, on obtient des observations factuelles ;
- un croisement de sources descriptives (texte), géolocalisées (photographies) et spatiales (images) en replaçant l'information dans le contexte géographique et temporel ;
- une base de référence de l'ensemble des sources d'informations sûres en favorisant la provenance directe des acteurs sur le terrain.

Nous sommes bien conscients que cette méthode qui a été efficace dans le cadre limité de cette thèse, s'avèrerait très insuffisante dans un cadre opérationnel.

5.1.2.3. Schéma décisionnel

L'étude de traficabilité décrite aux chapitres 3 et 4 s'appuie sur un ensemble de données optimales. Elle aboutit à deux échelles de diagnostics, pour une région, une date et un type de véhicule donnés. Dans la pratique, ces sources ne sont pas toutes disponibles au moment de l'analyse (arrêt des serveurs, panne d'un satellite,...), ou au lieu de l'analyse (image non diffusée, absence de cartes pédologiques,...). Leur disponibilité va orienter l'analyse sur des scénarii alternatifs, correspondant à un niveau ou différents niveaux de précision (Figure 161).

L'étude de traficabilité optimale, telle qu'elle est développée dans cette étude, aboutit aux diagnostics de niveau 1 et 3. Les diagnostics de niveau 0 et 2 sont sous-échantillonnés par rapport aux deux précédents, soit au niveau de l'interprétation pédologique, soit au niveau de la restitution de l'humidité.

Nous supposons que les archives Landsat et MODIS sont disponibles tout le temps et partout. Nous bornons cependant cette hypothèse aux zones strictement tropicales. Les régions équatoriales requièrent une approche différente en raison de la forte couverture végétale et nuageuse.

Lorsque le réseau routier ne peut être récupéré par source ouverte, il suppose soit sa digitalisation, soit son achat. Cette alternative ne rentre pas dans le cadre de notre étude car la démarche suppose une boucle de référencement-contrôle-validation et un budget. L'absence d'archive HR ou THR sur la zone cible oriente également l'étude sur ce type de démarche par un achat d'image.

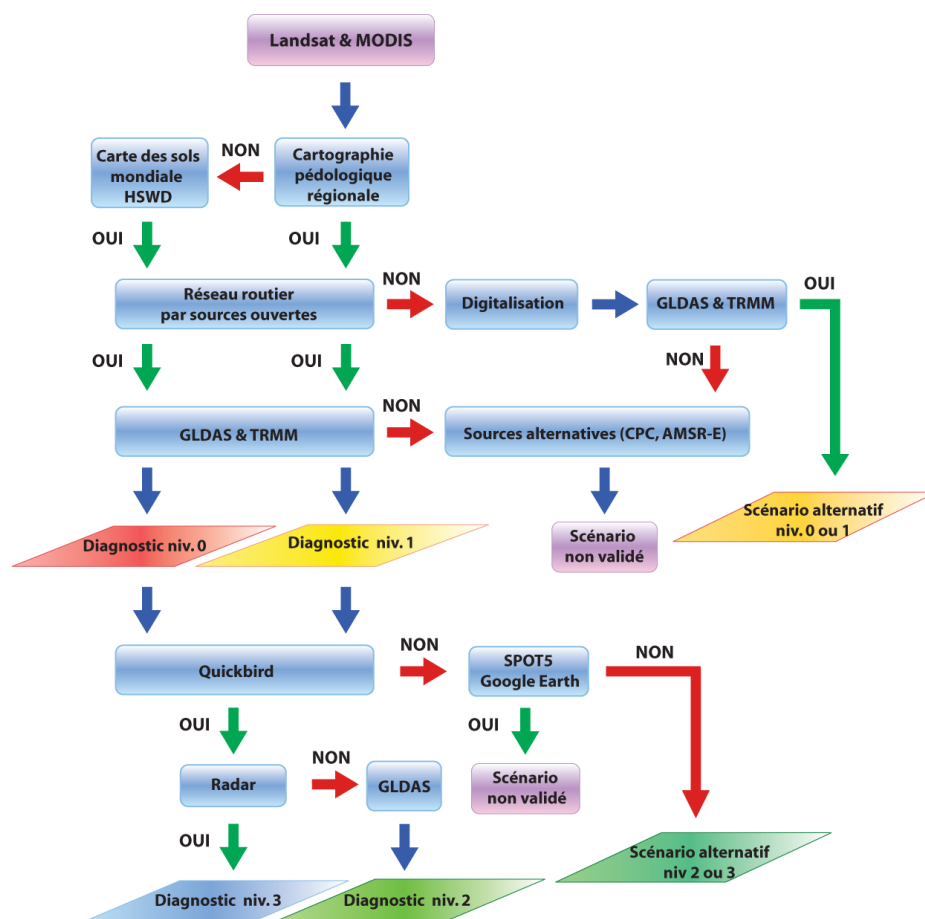


Figure 161 : Schéma décisionnel du modèle de traficabilité, selon la disponibilité des sources
 Ce schéma oriente la démarche en fonction de la présence (oui) ou de l'absence (non) de données disponibles issues des sources ouvertes. Les flèches bleues représentent une décision non modulable.

Pour les informations climatiques du modèle, nous proposons les données de précipitations du Climate Prediction Center (CPC) et les valeurs d'humidité du capteur AMSR-E en tant que sources alternatives possibles. Cependant, ces données n'ont pas été validées dans notre étude.

Les produits interprétés d'occupation du sol (Globcover et GlobalLandCover), de réseau hydrographique (Hydrosheds) ou d'alertes d'inondation (Reliefweb) sont considérés en tant que sources de qualification, et non d'alternative aux interprétations d'image. Elles ne sont donc pas intégrées au développement méthodologique. Cependant, cette démarche n'exclut pas de représenter certaines informations issues de ces sources (notamment liées aux risques de catastrophes naturelles et la présence de cours d'eaux importants s'ils ne sont pas détectés) sur la carte de traficabilité.

5.1.3. Voies d'amélioration

Si les points forts du modèle se concentrent autour de son exécution (facilité de mise à jour, diagnostic pour plusieurs véhicules, adaptabilité aux différents paysages du Tchad méridional, faible coût), ses faiblesses résident principalement dans les risques associés aux sources d'entrée (risques associés à l'utilisation des sources ouvertes et notamment à celle des images d'archives) et dans l'extrême simplification de la vision du véhicule (exclusivement basée sur la résistance de pénétration au cône du véhicule). Les améliorations potentielles du modèle portent alors, soit vers une optimisation des critères dimensionnant du modèle (délai de production, indépendance vis à vis des sources,...), soit vers une meilleure estimation de la mesure de traficabilité en réduisant ces risques (actualisation des images, services, sources mieux résolues ...).

5.1.3.1. Estimation du délai de production

Le temps de calcul va définir l'intervalle temporel minimum entre deux analyses. L'objectif est donc de caler ce temps de calcul avec les intervalles de production de données climatiques (humidité et précipitations).

Chaque nouvelle étude de traficabilité est élaborée suivant le protocole établi par le modèle, décrit au chapitre 2. L'étude se partitionne en deux chaînes de traitement principales correspondant aux deux échelles de restitution. Chacune d'elle se compose d'une interprétation d'images, aboutissant à la restitution de l'OCS, puis de l'estimation de l'humidité du sol, extraite d'un modèle d'assimilation ou d'imagerie radar selon l'échelle.

Le chapitre précédent détaille les tests, les orientations et les résultats des interprétations. Or, le temps de calcul effectif de chaque phase de traitement y apparaît difficilement. Le temps de calcul est ici repris en suivant la procédure telle qu'elle est décrite au chapitre 2, sans y inclure les étapes de tests.

Les choix de l'interprétation thématique des archives Landsat et de la combinaison sélective des traitements des images Quickbird se paient par un temps de calcul relativement élevé (Figure 162). La semi-automatisation des processus de traitement et de récupération des données climatiques a permis de réduire ce temps par 3 par rapport à un traitement manuel.

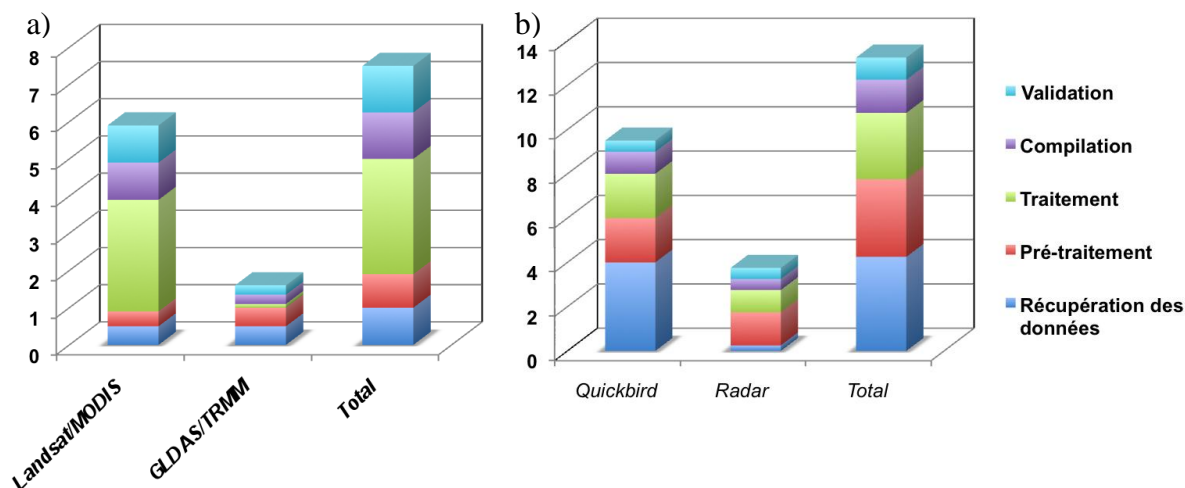


Figure 162 : Evaluation moyenne du temps de calcul (en heure) des traitements d'images pour l'extraction de l'occupation du sol (colonnes de gauche) et pour l'humidité du sol (colonnes du milieu)

Le processus de traitement est découpé en 5 phases, de la récupération des données à la validation. Le temps de calcul est donné en heure, pour une surface équivalente à une image Landsat (environ 10 000 km²), pour la restitution régionale (a), et à une image Quickbird (environ 250 km²), pour la restitution locale (b). Pour les deux échelles, l'extraction de l'occupation du sol est au minimum deux fois plus longue que la restitution de l'humidité. On peut toutefois considérer ces deux processus séparément. En effet, l'interprétation des images est un processus unique, alors que l'intégration de l'humidité et des précipitations doit être effectuée pour chaque diagnostic. En plaçant ce raisonnement dans une optique opérationnelle, réaliser l'occupation du sol par anticipation est sans doute la meilleure option.

La restitution cartographique ne représente que deux éléments sur les cinq du modèle. L'étude du sol et l'attribution des caractéristiques du réseau routier sont renseignés à partir de la recherche de sources ouvertes. Ces deux processus sont très longs, car le temps consacré à récupérer ces données et à les traiter (digitalisation du réseau, extraction des informations pédologiques, géocodage des cartes...) est considérable (Figure 163). Cette remarque est cependant spécifique à la région d'étude, pour laquelle il n'existe qu'une base de données pédologique à l'échelle globale, reposant sur les travaux des années 1960.

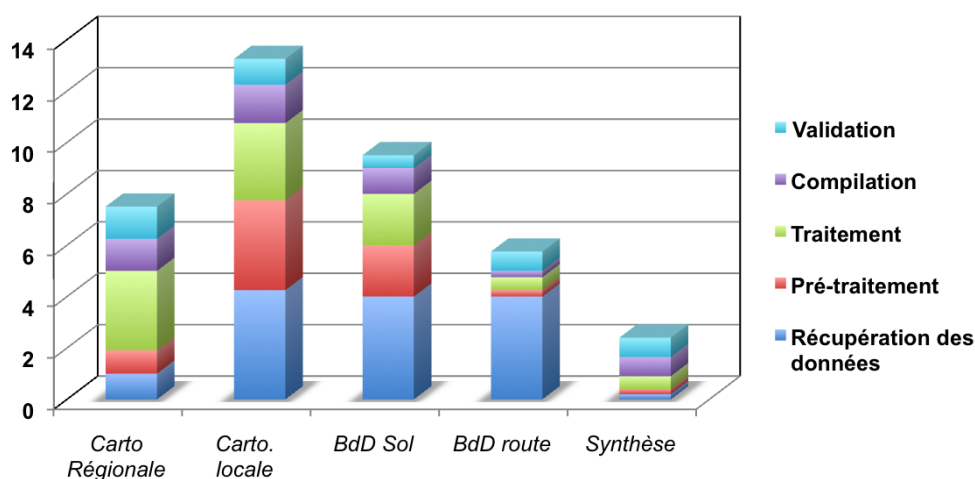


Figure 163 : Temps de production (en heure) du modèle de traficabilité

Le temps de calcul de l'élaboration des bases de données et de la synthèse de la restitution est basé sur la superficie d'une image Landsat. La récupération des données correspond à environ un tiers du temps de traitement total. Le téléchargement de ces données sous forme de service, même payant, permettrait de réduire d'autant ce temps de calcul.

En revanche, le modèle est construit pour qu'une fois la région analysée une première fois, la mise à jour ne dure qu'une fraction de l'étude initiale (Figure 164).

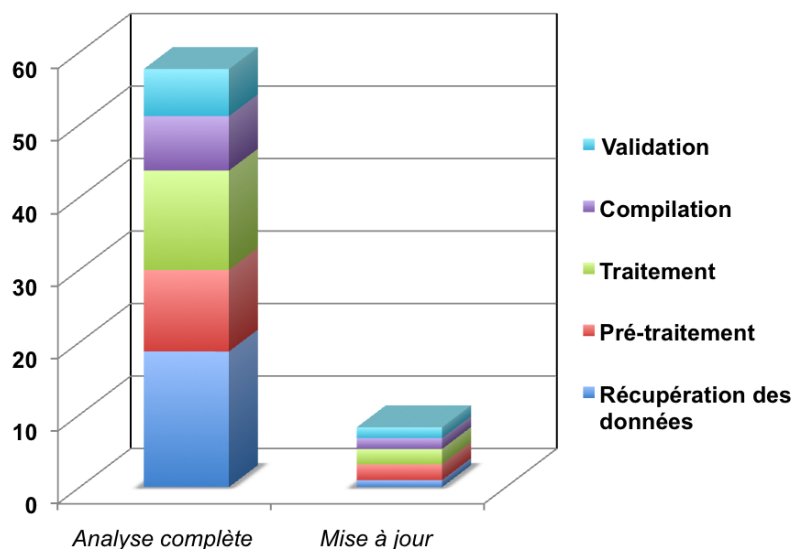


Figure 164 : Comparaison du temps de production (en heure) d'une analyse complète, et de sa mise à jour

Le temps de production total d'une analyse compte environ 57h. Sa mise à jour complète est réduite à 5h. Elle rassemble les trois processus de mise à jour : traitement de l'imagerie MODIS (obstacles de végétation et densité racinaire), traitement des données GLDAS et production de la carte de praticabilité des routes.

La réduction du temps de récupération, qui représente plus de 12h au total sur l'analyse, passe par la mise en place de services fiables dont le contenu serait disponible pour la communauté. Les institutions météorologiques américaines proposent déjà ce genre de service, pour les produits climatiques. Ils ont été intégrés au modèle. En revanche, il n'existe à l'heure actuelle aucun moyen de récupérer sur notre zone d'étude un réseau routier précis et actualisé (les projets Tracks4Africa, ou openstreetmap ne proposent pas encore de service de téléchargement) ni de données pédologiques numériques et harmonisées à une échelle régionale.

5.1.3.2. Evolution des sources d'acquisitions

Tout au long de cette recherche, l'évolution des supports de diffusion des sources de données, ainsi que l'appropriation de ces supports par la communauté d'utilisateurs ont renforcé la motivation à inclure ces sources dans le modèle.

En janvier 2006, la couverture des images THR disponible sur Google Earth pour le Tchad méridional se limitait à N'Djaména, Doba et quelques sites de camps de réfugiés en Ouaddaï. En 4 ans, cette couverture a été multipliée par 45 (Figure 165). Par ailleurs, depuis août 2009, une couverture harmonisée SPOT 5 à 2,5m remplace progressivement le fond Landsat. Elle permettra de disposer d'une information récente et uniforme de moins de 4 ans sur tout le territoire d'ici la fin de l'année.

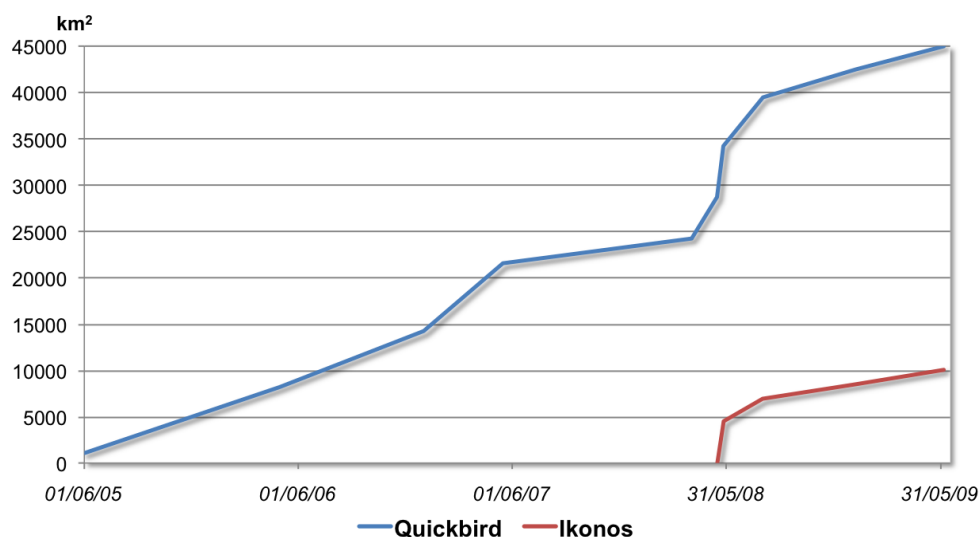


Figure 165 : Couverture THR du Tchad méridional disponible sur Google Earth depuis 4 ans

Jusqu'en juin 2007, la couverture THR concernait les villes principales et les points d'intérêt spécifiques (installations pétrolières, camps de réfugiés, lac Tchad, frontières). Depuis, les images se répartissent un peu partout, même dans des lieux très reculés (cœur du Salamat, désert).

Par ailleurs, le modèle fait abstraction du microrelief, par manque de sources potentielles. Il n'existe actuellement aucune méthode pour produire des modèles numériques de terrain de cette précision (inférieure au mètre verticalement) pour des opérations de cette envergure. La génération systématique de MNT par le futur couple TerraSAR-X – TANDEM-X permettrait de pallier cette absence et de mieux contraindre les zones à risques. Elle devrait également améliorer la précision des tracés hydrographiques par traitement du relief.

Le risque lié à l'obsolescence des images d'archives pouvait être important pour les agglomérations et dans les zones d'exploitation de ressources naturelles (ch5 1.2.1). A l'horizon 2013, l'intégration des sources LDCM et Sentinel2 devrait réduire considérablement ce risque, tout en restant parfaitement compatible avec les méthodes de traitement développées dans ce travail (le prochain capteur Landsat conserve exactement les mêmes caractéristiques techniques que le capteur Landsat 7 ETM+ détérioré depuis 2003).

Enfin, le développement de services de visualisation d'alertes et de prévention de catastrophes naturelles (GDACS, SERVIR,...) permettra à l'horizon 2010 de disposer d'outils pour la qualification de l'analyse.

5.2. Portée du développement méthodologique

La méthodologie développée sur les paysages du Tchad méridional peut –elle être appliquée telle quelle sur d'autres régions ou demande-t-elle des adaptations ? Pour répondre à cette question, nous avons porté le développement méthodologique sur la région des Monts Malimba, en République Démocratique du Congo. La problématique de traficabilité y est importante, mais les causes sont spécifiques de la zone concernée. Les conditions pédoclimatiques et de disponibilité de sources de cette zone tropicale africaine australe sont très différentes de celles rencontrées sur le territoire du Tchad méridional. Les adaptations et blocages au cours de la production du diagnostic de traficabilité permettront de fixer les limites d'adaptabilité méthodologique du modèle.

5.2.1. *Présentation de la zone test*

Les Monts Malimba bordent la rive occidentale du lac Tanganyika, par 7° de latitude Sud et 24,5° de Longitude Est (Figure 166). Le relief de cette région est escarpé et s'étend entre 500 et 3000m d'altitude. Située en bordure de rift, cette zone est régulièrement affectée par des tremblements de terre de magnitude moyenne. Elle est bordée au nord par des forêts primaires équatoriales. Les terres arables constituent l'essentiel des surfaces d'occupation du sol.

Le climat du Katanga est sahélien, avec une division de l'année en cycles d'une courte saison sèche de juin à septembre et d'une longue saison humide de novembre à avril. L'humidité de l'air dépasse 70% tout au long de l'année.

La problématique de traficabilité de cette région est liée à la mauvaise qualité des axes desservant Moba :

- la région est parcourue par de petits affluents qui se jettent directement dans le lac Tanganyika. Or le dénivelé important et les fortes précipitations donnent à ces cours d'eau un caractère torrentiel qui bloque la plupart des voies d'accès à la ville côtière principale, Moba ;

Le lac Tanganyika fait l'objet de prospections pétrolières et gazières. La ville de Moba est la plus importante sur la partie sud du lac au Congo et ses liaisons routières sont de mauvaise qualité (routes non revêtues et dégradées). De plus, des convois humanitaires circulent régulièrement jusqu'au port de Moba pour apporter un soutien aux réfugiés.

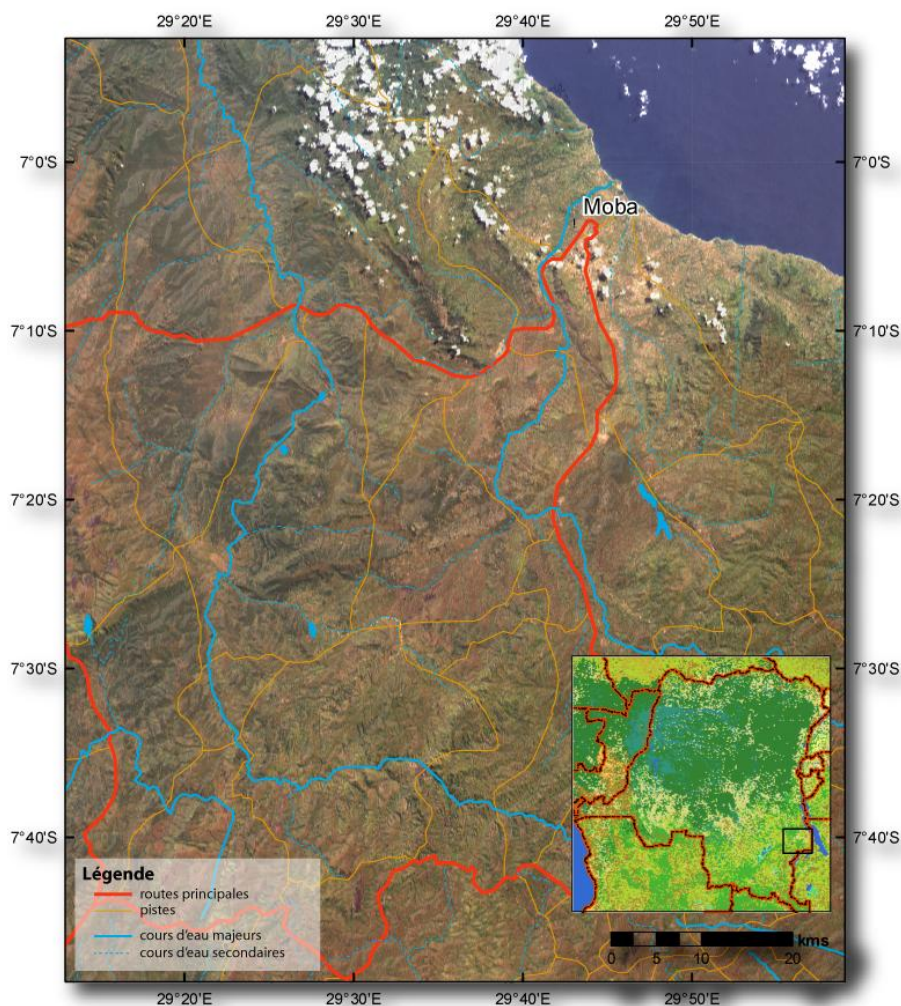


Figure 166 : Carte de la région des Monts Malimba, Katanga

La morphologie de la région alterne entre des vallées encaissées et des plateaux latéritiques. La teinte rouille caractéristique de ce type d'altération est visible sur toute la surface de l'image, à l'exception des surfaces boisées. Les terres arables se caractérisent par des fortes valeurs de réflectance, mais n'occupent que de petites étendues, sur les plateaux et près des villages.

5.2.2. Démarche

Nous avons récupéré sur cette zone une couverture orthorectifiée Landsat, un MNT SRTM, des données climatiques du modèle GLDAS et des données de précipitation TRMM pour 2008. La MONUC (Mission d'Organisation des Nations Unies au Congo), présente dans cette région du Congo a produit un réseau routier sous format vecteur, disponible en accès libre, actuel et complet. Seul le diagnostic à l'échelle régionale a été traité. En l'absence de données radar, l'intérêt de la production du diagnostic de traficabilité à l'échelle locale, malgré la présence de données Quickbird, est limité (diagnostic de niveau 2).

La source principale des données pédologiques sur la République Démocratique du Congo est la carte de la FAO harmonisée HWSM. Elle apporte, sur cette zone, des informations quantitatives précises sur la composition physico-chimique des sols. Ce pays n'a pas fait l'objet de campagne de terrain pédologique récente. La carte pédologique au 1 / 5 000 000^e du Zaïre a été produite dans les années 1950 et classe tous les sols de la région dans la catégorie des ferrisols.

Le Bureau de coordination des actions humanitaires des Nations Unies (OCHA) est mobilisé depuis 2007 dans la région de Moba. Il constitue la source majeure de données photographiques, car cette région est inaccessible pour les touristes depuis une dizaine d'années. Les informations sur l'état de la région et du réseau routier sont malgré tout assez faibles et éparses.

Cette pauvreté de données de « vérité terrain » a pour conséquence principale une plus grande difficulté à qualifier les résultats. Ces données documentaires ne sont cependant pas bloquantes dans le processus de production du diagnostic. L'approche méthodologique de traficabilité développée sur le Tchad méridional a donc été appliquée sur la RDC.

5.2.3. Résultats

Les traitements Landsat fournissent des résultats assez similaires à ceux obtenus sur le Ouaddaï. Les terrains sont majoritairement sableux, mais en teneurs très variables (pour le sable, elle est estimée entre 40 et 85%). La fraction argileuse est à dominance de kaolinite. Ces résultats sont cohérents avec les données issues de la carte des sols HWSM.

Les produits de végétation MODIS mettent en évidence une forte couverture arborée sur les plateaux des Mont Malimba. En revanche, les valeurs d'indice de végétation EVI et NDVI sont assez faibles. Le suivi phénologique de ces indices par imagerie MODIS montre un pic de croissance de la végétation au milieu de la saison humide (décembre-janvier). En juillet, les récoltes mettent à nu les terrains. L'usage du brûlis est très répandu sur les plateaux des Malimba et peut atteindre des surfaces supérieures à la centaine d'hectares.

Pour notre analyse, les sources ont été contraintes de la façon suivante :

- seul le réseau hydrographique principal est représenté, et sous forme vectorielle. Les cours d'eau sont trop étroits pour être détectés par imagerie Landsat ;
- les zones urbaines sont pratiquement inexistantes sur la zone ;
- les pentes supérieures à 20% sont considérées en tant qu'obstacles ;
- le réseau routier est constituée de routes latéritiques, non revêtues et très dégradées. La totalité du réseau est impraticable en saison humide ;
- les données d'humidité des sols et de précipitations ont été extraites au 7 juillet 2008, soit en milieu de saison sèche (Figure 167).

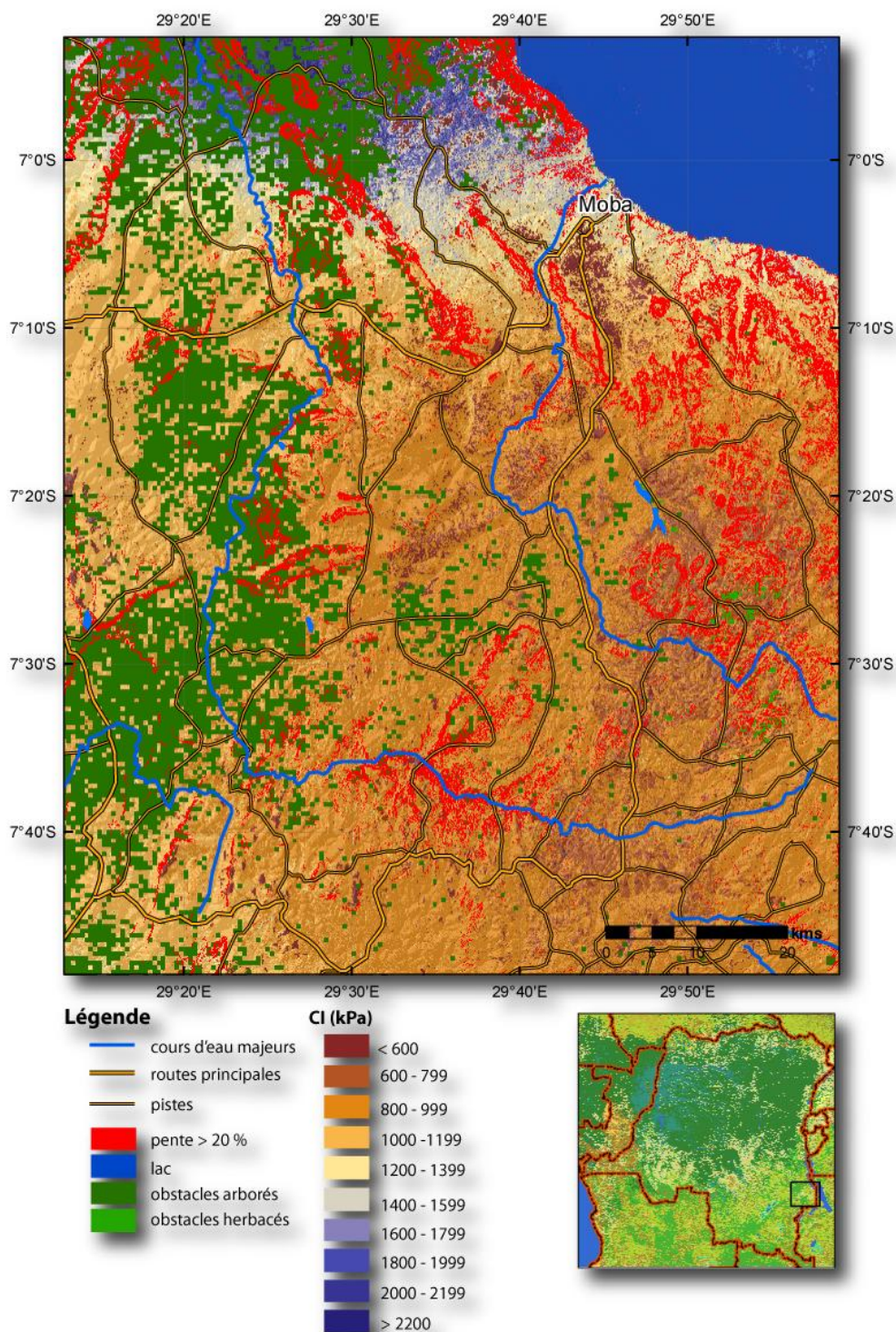


Figure 167 : Carte de praticabilité du sol et des pistes, à l'échelle régionale, de la région des Monts Malimba, au 3 juillet 2008

Le modèle d'estimation de la mesure de traficabilité est donc applicable sur une zone tropicale africaine éloignée de notre zone test, sans rencontrer de difficulté majeure. Des adaptations locales ont été nécessaires (représentation vectorielle du réseau hydrographique), mais elles ne remettent pas en cause le développement méthodologique. Toutefois, l'absence de données documentaires ouvertes a conduit à s'appuyer sur une seule source d'informations en libre accès, celle de la MONUC, sans pouvoir vérifier sa fiabilité.

Ce modèle étant adapté aux zones tropicales, il ne semble pas pertinent de l'appliquer à d'autres environnements climatiques, désertiques ou équatoriaux, qui soulèveraient d'autres problèmes. De plus, les fortes variations de contraste des images Landsat demanderaient un ajustement de toutes les fonctions de conversions calculées dans les processus de traitement d'image. Enfin, la variabilité des contextes pédoclimatiques imposerait de nouvelles corrélations entre les propriétés pédogénétiques et la classification géotechnique LPC/USCS.

Cette application de la méthodologie à des régions tropicales australes a permis de mettre en évidence les limites suivantes :

- l'absence de données pédologiques précises a gêné la calibration des valeurs de réflectance des images Landsat avec les types de sols ;
- la dépendance du modèle aux données documentaires rend nécessaire le temps de recherche et de récupération de données ouvertes pour qualifier les estimations.

Ces conditions constituent les limites de connaissances a priori du modèle.

5.3. Perspectives

Ce travail de recherche nous a conduit à proposer une méthode de production de diagnostics de traficabilité en zone tropicale, à partir de sources d'imagerie multispectrales et radar, et de données en sources ouvertes. A l'issue de son application sur différents environnements pédoclimatiques et géographiques, cette méthode a révélé sa pertinence dans l'intégration des données de sources ouvertes pour la mesure de la traficabilité et sa mise à jour. L'analyse de la qualité du diagnostic a par ailleurs mis en évidence certaines limites dans l'application de la méthode liées notamment à la disponibilité de ces sources ainsi qu'à leur utilisation en tant qu'archives.

Ces limites perceptibles dans l'état actuel de disponibilité des sources, promettent d'être à l'avenir en partie repoussées :

- à l'horizon 2013, les données issues de la mission LDCM permettront de disposer d'une couverture actualisée du fond d'imagerie aujourd'hui disponible par les archives Landsat, tout en conservant les mêmes caractéristiques techniques. Les méthodes de traitement développées dans ce travail dérivées de ce capteur devraient ainsi rester parfaitement compatible ;
- suite à la prise de conscience de l'intérêt des données géographiques pour l'observation des conséquences du réchauffement climatique, les systèmes de diffusion d'informations prennent la voie de services thématiques ouverts, et mis à jour automatiquement (SERVIR, Groads, Tracks4africa, ...). L'intégration de ces données dans un modèle 4D permettrait alors sa diffusion et sa visualisation sur un globe virtuel, voire la prédiction des conditions de traficabilité.

La difficulté à valider la méthodologie proposée dans ce travail tient essentiellement à l'impossibilité de réaliser des mesures sur le terrain. Les campagnes de mesures, programmées au démarrage de l'étude, n'ont pas pu avoir lieu, en raison des très mauvaises conditions d'accès au territoire tchadien. Toutefois, les relevés réalisés dans le cadre du programme ECORS, sur la problématique de traficabilité, devraient apporter des informations qualitatives qui permettront de vérifier certaines hypothèses proposées dans cette étude (paramètres dimensionnant la traficabilité, réaction de l'état d'humidité des sols en fonction des précipitations,...). Ces missions sont prévues au Maroc en 2010.

Le capteur TerraSAR-X a montré une bonne capacité à restituer les variations d'humidité du sol en polarisation HH, mais elle se limite à des terrains peu rugueux, en raison du domaine de fréquence utilisé (bande X). Des tests multi-incidences permettraient de compléter ces résultats et conclure sur une configuration optimale pour caractériser les variations d'humidité des sols. Par ailleurs, l'élaboration de bases de données de mesures d'humidité prises sur le terrain permettrait de recalibrer la rétrodiffusion du signal radar du capteur TerraSAR-X. Les perspectives offertes par les propriétés quadri-polarimétriques en bande C du capteur Radarsat-2 devraient également ouvrir de nouvelles perspectives dans l'extension de cette mesure aux terrains végétalisés et rugueux.

L'étude proposée a fait abstraction du microrelief (dénivellation inframétriques), car il n'existe actuellement aucune méthode pour produire des modèles numériques de terrain de cette précision pour des opérations de cette envergure. Ce microrelief correspond à des artefacts de hauteurs compris entre 0,5 et 1m pouvant bloquer un franchissement (talus, talweg, bloc rocheux, obstacle anthropique divers). La génération systématique de MNT par le futur couple TerraSAR-X – TANDEM-X permettrait de pallier cette absence par une précision altimétrique de l'ordre du mètre, et de mieux contraindre les zones à risques. Elle devrait également améliorer la précision des tracés hydrographiques par traitement du relief.

La propagation des erreurs n'a pas été envisagée dans le processus de production. En l'absence de référence par des mesures de terrains fiables, il nous a semblé délicat de proposer un calcul reposant uniquement sur des estimations. Une campagne d'expérimentation menée en parallèle à l'acquisition d'images optiques et radar ciblées sur un nombre limité de zones géographiques correspondant à des environnements spécifiques permettrait de développer cet aspect.

Enfin, la spatialisation de la mesure de résistance au cône par données de télédétection que nous avons mise en œuvre dans ce travail ouvre la perspective d'applications en géotechnique qui reposent aujourd'hui sur un grand nombre de mesures. On peut évoquer la stabilisation des fondations des massifs superficiels pour le tracé de pipeline ou des assises de voies ferrées par exemple, au stade d'études de pré faisabilité.

Conclusions Générales

La disponibilité d'images satellites via des serveurs et globe virtuels est récente. Elle crée un apport potentiel dans la perspective de développer de nouveaux services pour l'accès aux secteurs difficilement accessibles par voie terrestre. La dimension collaborative et interactive de ces supports permet de disposer d'une très grande quantité d'informations qu'il aurait été autrement très difficile d'obtenir. Cette profusion de données engendre en contrepartie un besoin de qualification des sources utilisées.

Dans cette thèse, nous avons proposé une méthode de production de diagnostics de traficabilité en zone tropicale, à partir de sources d'imagerie multispectrales et radar, et de données en sources ouvertes.

Nous avons défini les paramètres de densité de végétation (au-dessous et au-dessus de la surface du sol), type de sol, degré de pente, précipitations, humidité du sol, zone urbaines, barrières hydriques permanentes, état et revêtement des routes et mobilité du véhicule comme dimensionnant la problématique de traficabilité en contexte tropical. Nous avons ensuite proposé une méthode de reconnaissance à partir d'imagerie satellitaire de ces paramètres, afin de restituer des diagnostics de traficabilité sous forme cartographique. Le partitionnement de cette méthode en modules d'interprétation et de mise à jour autorise son exploitation en contexte de routine et d'urgence. Le calcul de l'actualisation de la mesure de traficabilité, groupé en trois processus, est, dans le cadre de ce travail, inférieur à 3h.

Les corrélations entre les classifications pédologiques et géotechniques des sols ont été réalisées à partir des informations extraites des cartes et notices d'archives. En respectant certaines contraintes (région pédoclimatique, validité pour l'horizon de surface), ces corrélations ont été validées pour tous les sols du Tchad méridional. Ces sols ont ensuite été reconnus par traitement de l'imagerie optique Landsat 7 ETM+. L'utilisation conjointe de données Landsat et MODIS a permis de produire une interprétation dynamique de l'occupation du sol, et de reproduire quantitativement l'évolution saisonnière de la couverture végétale et son impact sur la cohésion du sol. Par cette cartographie de la végétation et des différents types de sols, nous avons produit une spatialisation de la mesure de résistance à la pénétration au cône, modélisée en fonction de l'humidité du sol, pour chaque classe LPC/USCS.

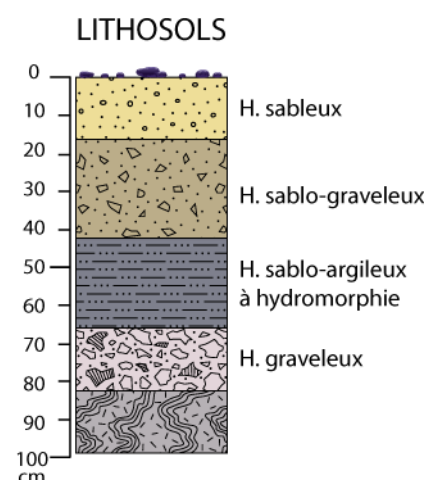
Le potentiel du capteur TerraSAR-X a été évalué pour plusieurs configurations de polarisation et mode de résolution. En raison de la mauvaise qualité des images de saison sèche (mars 2008), de l'absence de mesures de calibration de terrain et du contexte d'acquisition de ces images, ces évaluations sont partielles. De plus, la rareté des publications sur bande de fréquence X en rapport avec l'humidité du sol a orienté notre démarche sur des résultats validés sur une fréquence plus faible (C).

L'intégration des données ouvertes à plusieurs étapes clés du processus a permis de produire des diagnostics de traficabilité à faible coût, compatible avec les objectifs. Dans le cadre de cette étude, nous avons inclus l'imagerie radar TerraSAR-X dans le processus de mesure de traficabilité à l'échelle locale. Ce choix ne signifie pas nécessairement que ce capteur est le mieux adapté. Les perspectives offertes par les capteurs Radarsat-2 et Cosmo-Skymed doivent être également envisagées.

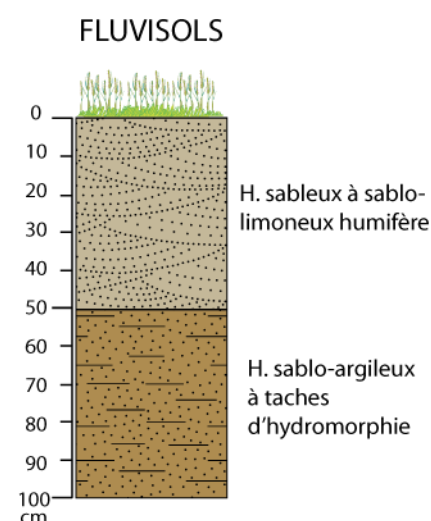
L'approche développée dans cette étude constitue une avancée dans la démarche d'estimation de la mesure de traficabilité. Elle démontre que l'intégration de données en sources ouvertes et d'archives permet de contourner une grande partie des contraintes de production de cette mesure en contexte opérationnel, et de produire ainsi des diagnostics véritablement exploitables pour l'aide à la décision.

Description pédogénétique des sols du Tchad méridional et profils types

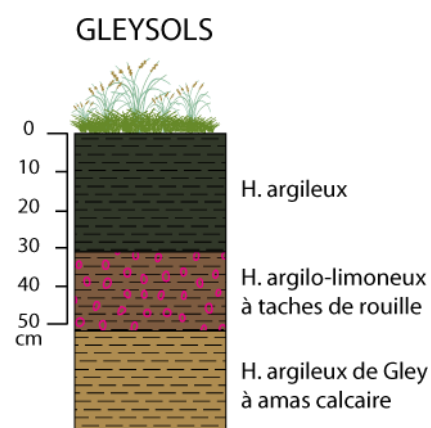
Les **Lithosols** (FAO, 2006) résultent d'une intense pédogénèse ancienne rajeunie. Ils sont constitués généralement par un horizon supérieur gris à noirâtre, peu épais, à texture sableuse à graveleuse. Ces sols peu épais, 50 à 70 cm en moyenne présentent, en profondeur, une hydromorphie irrégulière par lessivage oblique d'argile et de fer, et une très faible capacité de drainage. L'horizon inférieur est une arène grossière dont la composition varie avec la nature de la roche mère sous-jacente. Les horizons supérieurs sont majoritairement composés de quartz, feldspaths et graviers ferrugineux.



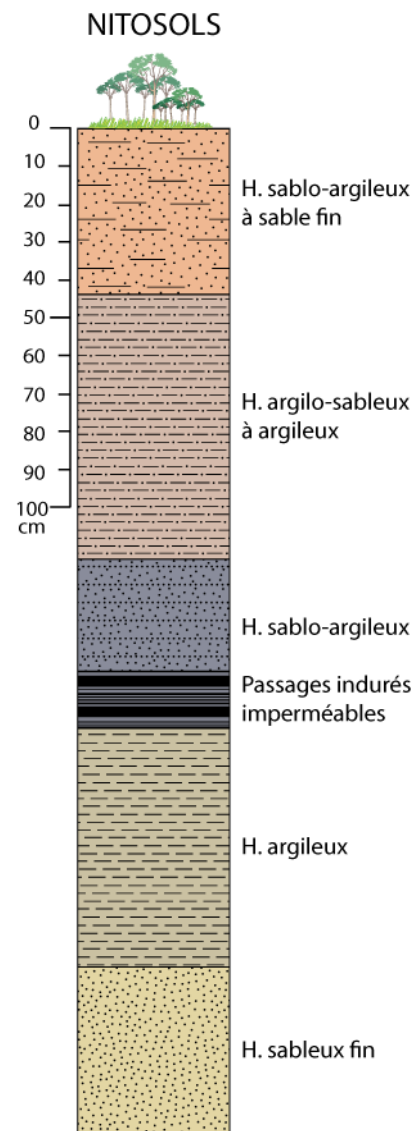
Les **Fluvisols** (FAO, 2006) sont constitués par un profil stratifié à deux horizons distincts. Ils manifestent, du fait de leur texture riche en éléments fins, un caractère d'hydromorphie. L'horizon supérieur humifère est sableux à sablo-limoneux, drainant, peu cohésif et peu compacté. Il passe vers 50 cm de profondeur, à un horizon sablo-argileux à caractère hydromorphique en tache.



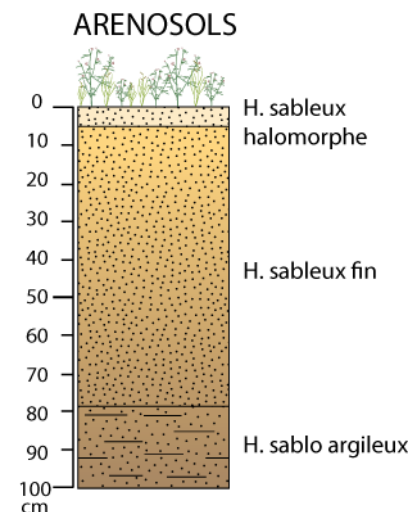
Les **Gleysols** (FAO, 2006), sont caractérisés par une fraction argileuse dominante sur l'ensemble du profil (35 à 50%). Elle est composée, en teneurs variables, de montmorillonite calciques (30 à 50%) et de kaolinite (40-70%). L'horizon de surface, épais d'environ 30 cm, est noir, imperméable, à compacité et cohésion forte. L'horizon intermédiaire, plastique à tendance limoneuse (15-20%), est ocre à taches de rouille. L'horizon de profondeur à Gley est jaune et peut contenir des amas calcaires.



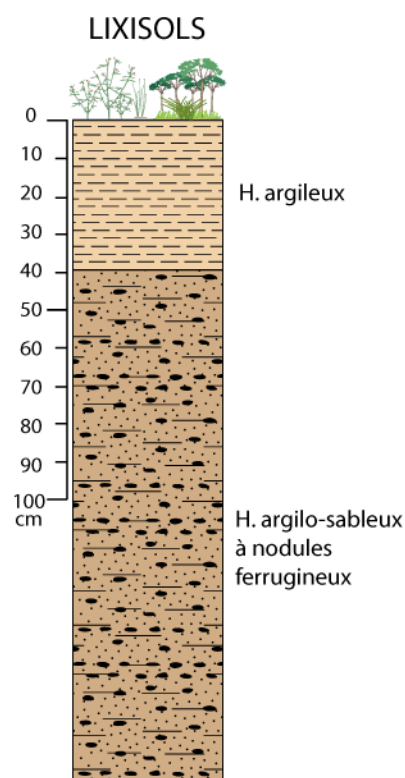
Les **Nitosols** (FAO, 2006) (sols rouges à brun-rouge tropicaux) sont constitués par un horizon de surface, sablo-argileux à sable fin avec moins de 30 % d'argiles, épais de 30 à 50 cm. De faible compacité et peu cohésif, ils sont soumis à une faible érosion. Les horizons inférieurs argilo-sableux assurent une forte stabilité de l'ensemble du profil par une forte compacité et des passages indurés imperméables à nodules ferrugineux. Ils sont poreux, bien drainant et perméable en surface. La kaolinite est dominante (80-90%) dans ces sols. Le profil a une puissance de 7 à 10 m.



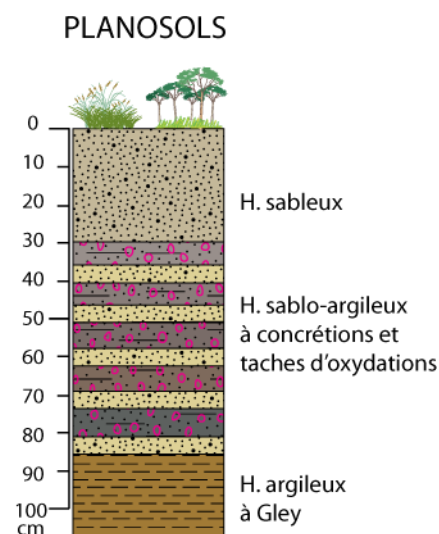
Les **Arénosols** (FAO, 2006) sont peu cohésifs très sableux et très pauvre en matière organique. Ils s'enrichissent légèrement en argile en profondeur (5 à 10%). Ils ont une puissance de 80 à 100 cm en moyenne. Ces sols sont peu drainant à cause de formations d'exsudats hydrophobes, particulièrement intenses après une longue période d'exposition au soleil, qui conduisent à une infiltration différentielle de l'eau. Ils sont peu poreux et peu perméables ($K < 4.10^{-2}$ m/s). La fraction argileuse est à dominante de kaolinite (60-80%).



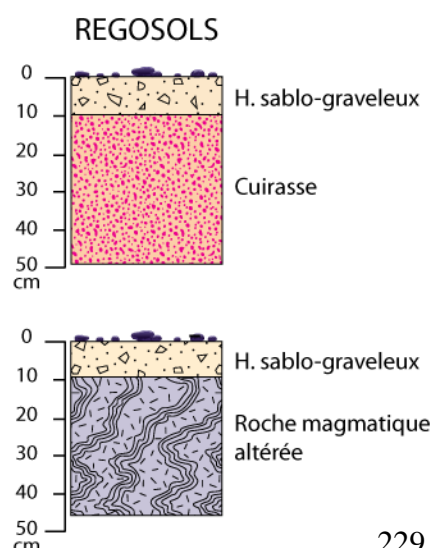
Les **Lixisols** (FAO, 2006) sont constitués d'un horizon de surface argileux, épais de 40 cm en moyenne, faiblement organique et faiblement cohésif. En profondeur, il passe à un horizon argilo-sableux (20 à 40% d'argile) pouvant atteindre 8m, et riche en nodules ferrugineux. Ces sols peuvent localement contenir jusqu'à 30% de limons. La fraction argileuse, est constituée de kaolinite (50%), de Montmorillonite (35%) et d'illite (15%).



Les **Planosols** (FAO, 2006) sont constitués par un horizon de surface, compact, cohésif et épais de 30 à 40 cm. Celui-ci est appauvri en argile (0-25%) et montre des traces de stagnation temporaire d'eau. Il s'interstratifie avec un horizon sablo-argileux à concrétion et taches d'oxydations et de réductions ferrugineuses (correspondant à l'alternance annuelle des saisons). Il passe vers un mètre de profondeur à un horizon de Gley argileux, imperméable, typique de sols inondés temporairement. Ces sols denses sont faiblement perméables et peu drainants. La composition de la fraction argileuse est variable, à dominante de montmorillonite calc-magnésienne (50%) dans partie aval du Chari tandis que les sols du Logone contiennent majoritairement de la kaolinite (60%). L'illite représente toujours à peu près 20%.

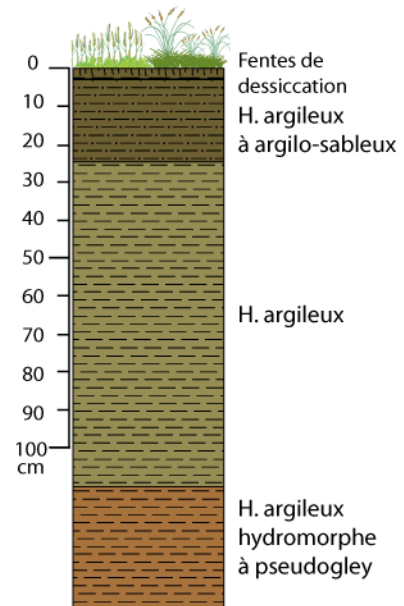


Les **Régosols** (FAO, 2006) ont une texture sableuse grossière, sans horizons. Ils peuvent contenir jusqu'à 40% de graves émoussées. Ces régosols sont parfois entièrement recouverts de concrétions de fer et de manganèse, qui apparaissent alors rouille à noir-bleuté.



Les **Vertisols** (Aubert, 1965; FAO, 2006) sont caractérisés, au Tchad méridional, par une dominance argileuse dont la proportion d'argile gonflante de type montmorillonite peut être très importante. Cette fraction argileuse des sols vertiques varient entre 35 et 70% localement, et se compose, dans le bassin du Logone-Chari, de 70 à 90% de kaolinite, et au nord du Guéra, de 50% de montmorillonite et de kaolinite. Il se compose d'un horizon de surface peu épais (20-30 cm), brun-noir, argilo-sableux à argileux et très cohésif. Il surmonte un horizon argileux hydromorphe à pseudo-gley et traces de rouilles, localement enrichi en nodules calcaires (sud du Salamat).

VERTISOLS



Les **Solonchaks** et les **Solonetz** sont structurés en trois horizons dont le profil dépasse rarement un mètre. La fraction argileuse augmente progressivement en profondeur pour atteindre 40%. Les solonetz solodisés concentrent les précipitations de sels sur un horizon compact et à forte cohésion, entre 20 et 50 cm. La fraction argileuse de l'horizon de surface, qui peut atteindre 30%, contient environ 50% de montmorillonite, 40% de kaolinite et 10% d'illite. Ces sols sont faiblement drainants. Une forte concentration en ions Ca^{++} réduit leur capacité d'adsorption de l'eau.

SOLONETZ & SOLONCHAKS

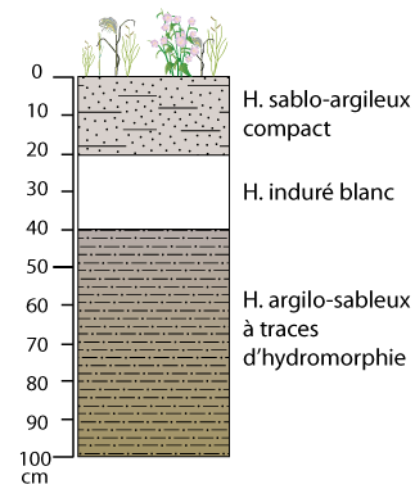




Figure 168 : Andropogonées (*Andropogon gerardii*) recouvrant un planosol en fin de saison des pluies (6 octobre 2008), N'Djamena.

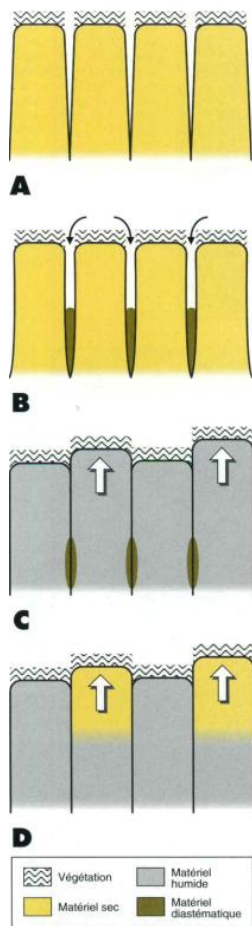


Figure 169 : Illustration et mécanisme de formation des microreliefs gilgai (Verger, 1994)
 A. De profondes fentes de dessiccation se développent dans un vertisol en y déterminant des colonnes bien individualisées. B. Les animaux, vents et averses précipitent des particules dans les fentes de dessiccation. C. Le matériau exerce une pression en profondeur qui soulève un certain nombre de colonnes. D. Le mouvement amorcé se poursuit.

Caractéristiques techniques des capteurs satellitaires utilisés

Landsat 7 ETM+

Plate-forme : Landsat 7

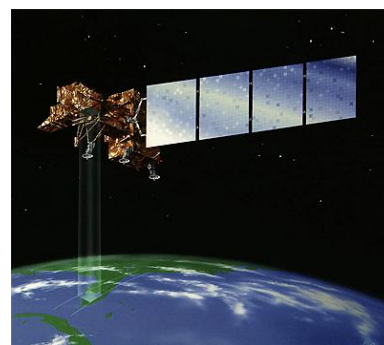
Capteur : ETM+

Type de capteur : multispectral optique

Nombre de bandes spectrales : 8

Fauchée : 185 km

Résolution : 28,5 m (bandes 1 à 5 et 7), 14,25 m (bande 8), 60m (bande 6)



Bande spectrale	Domaine de fréquence	Intervalle de fréquence (μm)
1	Bleu visible	0,45 à 0,515
2	Vert visible	0,525 à 0,605
3	Rouge visible	0,63 à 0,690
4	Infrarouge proche	0,75 à 0,90
5	Infrarouge moyen	1,55 à 1,75
6	Infrarouge thermique	10,4 à 12,5
7	Infrarouge moyen	2,09 à 2,35
8 (panchromatique)	visible	0,52 à 0,90

Base de référence :

- Pour des informations techniques plus détaillées, se référer au Landsat Data User Handbook (http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook_toc.html) ;
- Actualités sur le programme Landsat et sa continuité se référer au site de la NASA (<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>) ;
- Données Landsat en téléchargement par le site du GLCF (couverture unique sur une zone ; <http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>) ou en commande par le site de l'USGS (presque toutes les images disponibles depuis Landsat 1 ; <http://glovis.usgs.gov/>).

Continuité de la mission : LDCM (2012)

MODIS

Plate-forme : EOS AQUA et TERRA

Capteur : MODIS

Type de capteur : multispectral optique

Nombre de bandes spectrales : 36

Fauchée : 2330 km

Résolution : 250 m (bandes 1-2), 500 m (bande 3 à 7), 1000m (bandes 8 à 36)



Bande spectrale	Phénomène observé	Intervalle de fréquence (µm)
1	continents, nuages, aérosols	0,62 à 0,670
2		0,841 à 0,876
3		0,459 à 0,479
4		0,545 à 0,565
5		1,230 à 1,250
6		1,628 à 1,652
7		2,105 à 2,155
8 à 16	Coloration de l'océan, phytoplancton	0,405 à 0,877
17 à 19	Vapeur d'eau atmosphérique	0,890 à 0,965
20 à 23	Température nuage/sol	3,660 à 4,080
24 - 25	Température atmosphérique	4,433 à 4,549
26 à 28	Vapeur d'eau des cirrus	1,36 à 7,475
29	Propriétés des nuages	8,4 à 8,7
30	Ozone	9,580 à 9,880
31 - 32	Température nuage/sol	10,780 à 12,270
33 à 36	Altitude du sommet des nuages	13,185 à 14,385

Base de référence :

- Informations techniques plus détaillées sur le site de la NASA (<http://modis.gsfc.nasa.gov>);
- L'imagerie MODIS est disponible en temps réel sur le serveur Rapidfire (<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/>) ;
- Presque tous les produits MODIS sont archivés sur le serveur Land Data Processes Distributed Active Archive Center de l'USGS (LP DAAC, https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/get_data/data_pool) ;
- Les produits de végétation MODIS Vegetation Continuous Field (% herbacés/arbres/sols nus) sont archivés sur le serveur du Goddard Space Flight Center (http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD_GLCF_MODIS_VCF.html). Accessible également depuis le serveur WIST de la NASA (<https://wist.echo.nasa.gov/api/>)

QUICKBIRD

Plate-forme : Quickbird

Capteur : Quickbird

Type de capteur : multispectral optique

Nombre de bandes spectrales : 5

Fauchée : 16,5 km

Résolution : 0,61 cm au nadir (panchromatique), 2,44m au nadir (multispectral)



Bande spectrale	Domaine de fréquence	Intervalle de fréquence (nm)
1	Bleu visible	450 à 520
2	Vert visible	520 à 600
3	Rouge visible	630 à 690
4	Infrarouge proche	760 à 900
Panchromatique	visible	450 à 900

Base de référence :

- Pour des informations techniques plus détaillées, se référer au SpaceCraft Data Sheet fourni par l'opérateur Digital Globe : (<http://www.digitalglobe.com/index.php/85/QuickBird>) ;
- Les données peuvent être commandées en ligne via un visualisateur (Image Finder ; <http://browse.digitalglobe.com/imagefinder/main.jsp>) ;
- Un grand nombre d'archives sont accessibles sur Google Earth

Continuité de la mission : WorldView-1 (2007) et WorldView-2 (2009)

COSMO-SKYMED

Plate-forme & capteur : Constellation Cosmo-Skymed

Type de capteur : radar actif

Bande spectrale : X (9,6 GHz)

Incidence : 20 à 60°



Mode	Polarisation	Fauchée	Résolution capteur
ScanSAR Huge	HH, HV, VH, VV	400x400km	100m
ScanSAR Wide	HH, HV, VH, VV	300x300km	30m
Stripmap	HH, HV, VH, VV	40x40km	5m
Polarimetric	HH-HV, HH-VV, VV-VH	30x30km	20m
Spotlight	HH, VV	10x10km	1m

Base de référence :

- Pour des informations techniques plus détaillées, se référer au COSMO-Skymed SAR Products Handbook (ASI, 2007, <http://www.e-geos.it/docs/asi.pdf>) et au COSMO-Skymed System Description and User Guide (http://www.e-geos.it/docs/asi_.pdf).

Continuité de la mission : 3 satellites opérationnels – 4^e en 2010 – 2^e constellation Cosmo-Skymed 2 prévue

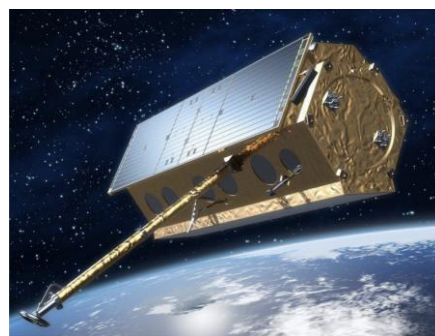
TerraSAR-X

Plate-forme & capteur : TerraSAR-X

Type de capteur : radar actif

Bande spectrale : X (9,65 GHz)

Incidence : 15 à 60°



Mode	Polarisation	Fauchée	Résolution capteur
ScanSAR	HH, HV, VH, VV	100x100km	18,5m (A), 1,7-3,5m (G)
Stripmap (S)	HH, VV	30x30km	3,3 m(A), 1,7-3,5m (G)
Stripmap (D)	HH, HV, VH, VV	15x15km	6,6m (A), 1,7-3,5m (G)
Spotlight (S)	HH, VV	10x10km	1,7m (A) 1,48-3,5m (G)
Spotlight (D)	HH-VV	10x10km	3,4m (A) 1,48-3,5m (G)
High Resolution Spotlight (S ou D)	HH-VV, HH, VV	5x10km	1,1m (S-A)/2,2m (D-A) 1,48-3,5m (G)

(S et D : simple et double polarisation ; A : Azimuth, G : Ground range)

Base de référence :

- Pour des informations techniques plus détaillées, se référer au TerraSAR-X Ground Segment Basic Product Specification (Fritz et Eineder, 2009 ; <http://sss.terrasar-x.dlr.de/pdfs/TX-GS-DD-3307.pdf>).

Continuité de la mission : TanDEM-X (2009) et 2^e constellation prévue.

- Abadie, J., & Franz, H. (1957). *Contribution à la connaissance de la stratigraphie et climatologie du Quaternaire dans le bassin du lac Tchad*. document inédit.
- Abdeen, M. M., Thurmond, A. K., Abdelsalam, M. G., & Stern, R. (2001). Application of ASTER band)ratio images for Geological mapping in ard regions : the Neoproterozoic Allaqi Suture, Egypt. *Geological Society of America Annual Meeting*.
- Abdellaoui, A., & Rougab, A. (1997). *Télédétection des milieux urbains et périurbains*. AUPEL-UREF, Sophia-Antipolis.
- Abdellaoui, A., Rougab, A., & Betria, B. (1994). Caractérisation du bâti et SIG pour une agglomération à fort taux de croissance : cas de l'agglomération blidéenne. *Colloque international "Télédétection, SIG et formation"*. Toulouse.
- Adrienko, G., & Adrienko, N. (2003). Raster Synthesis Used in the Cross Country Movement Displaying,. *Conference report from ICA Commission on Maps Internet & ICA Commission on Visualization and Virtual Environments. Joint Annual Meeting 2003*.
- Ahlvin, R. B., & Haley, P. W. (2001). *NATO Reference Mobility Model, Edition II, NRMM II User Guide. Technical Report GL-92-19*. Vicksburg, MS: US Army ENgineer Waterways Experiment Station.
- Al-Abbas, A. H., Swain, P. H., & Baumgardner, M. F. (1972). Relating organic matter and clay content to the multispectral radiance. *Soil Sci. , 114*, pp. 477-485.
- Allenbach, B., & Battiston, S. (2006). *Exploitation comparée des images aéroportées et spatiales pour la caractérisation d'un épisode d'inondation dans les grand delta du Rhône*. Rapport du Lot 4, validation et synthèse des résultats. MEDD.
- Amar, S., & Jézéquel, J.-F. (1998). *Propriétés mécaniques des sols déterminées en place*. Techniques de l'ingénieur - Traité de construction.
- Amar, S., & Magnan, J.-P. (1980). *Essais de mécanique des sols en laboratoire et en place*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Département des sols et fondations. Paris: LCPC.
- ASI. (2007). *Cosmo-Skymed SAR Produits Handbook*. ASI. Roma: ASI.
- Atterberg, A. (1905). Die rationale Klassifikation der Sande und Kiese. *Chemiker Zeitung , 29*, pp. 195-198.
- Aubert, G. (1965). Classification des sols. *Cahier ORSTOM - série pédologique , III (3)*, p. 20p.
- Aubron, I. (1993). *Télédétection et distribution spatiale des sols calcaires en petite Beauce*. Mémoire de DEA, Université de Nancy I, Géosciences filière pédologie.
- Autret, E., Bernard, R., & Vidal-Madjar, D. (1989). Theoretical study of the sensivity of microwave backscatteting coefficient to the soil surface parameters. *International Journal of Remote Sensing , 10 (1)*, pp. 171-179.

- Baatz, M., & Schäpe, A. (2000). Multiresolution Segmentation - an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. Dans J. Strbl, *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII* (pp. 12-23). Karlsruhe.
- Baccini, A., Laporte, N., Goetz, S. J., Sun, M., & Dong, H. (2008). A first map of tropical Africa's above-ground biomass derived from satellite imagery. *Environmental Research Letters*, 4, pp. 4-11.
- Baghdadi, N., Grandjean, G., Lahondère, D., Paillou, P., & Lasne, Y. (2004). Apport de l'imagerie satellitaire radar pour l'exploration géologique en zones arides. *Compte rendus de l'Académie des Sciences - Géosciences*, 337 (8), pp. 719-728.
- Baghdadi, N., Holah, N., & Zribi, M. (2006). Soil Moisture estimation using multi-incidence and multi-polarization ASAR SAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 26.
- Baghdadi, N., Zribi, M., Loumagne, C., Ansart, P., & Anguela, T. P. (2008). Analysis of TerraSAR-X data and their sensitivity to soil surface parameters over bare agricultural fields. *Remote Sensing of Environment*, 112 (12), 4370-4379.
- Bailloeuil, T., Prinnet, V., Serra, B., Marthon, P., Chen, P., & Zhang, H. (2005). Urban building land use change mapping from high resolution satellite imagery, active contours and Hough voting. *International Symposium on Physical Measurements and signature in Remote Sensing (ISPMSRS)*.
- Bannari, A., Morin, D., & He, D. C. (1997). *Caractérisation de l'environnement urbain à l'aide des indices de végétation dérivés des données de hautes résolutions spatiales et spectrales*. CARTEL, Télédétection des milieux urbains et péri-urbains. Sherbrooke: EURELF-UREF.
- Baohoutou, L. (1997). *Evolution de la pluviométrie au Sahel Tchadien de 1952 à 1994*. Inst. de Géographie. mémoire de DEA.
- Baohoutou, L. (1996). *Le climat de N'Djamena*. Mémoire de maîtrise, N'Djamena.
- Barbeau, J. (1956). *Carte géologique de reconnaissance de Fort Lamy. Levés effectués de 1949 à 1953*. Paris: Imprim. Nat.
- Bardinet, C., & Cabot, J. (1985). Télédétection de paysages tchadiens par Landsat. *L'information géographique*, 49 (2), pp. 45-52.
- Bardinet, C., & Monget, J.-M. (1979). Télédétection et Géographie appliquée en Zone sahélienne du Tchad. *Coll. ENSJF*, (pp. 1-543). Paris.
- Bariou, R., Lecanu, D., & Le Henaff, F. (1985). *Dossier de télédétection : réponse spectrale des végétaux*. Université de Rennes, Rennes.
- Batjes, N. H. (2003). *A taxo-transfert rule-based approach for filling gaps in measured soil data in primary SOTER database (GEFSOC Project)*. Wageningen: ISRIC.
- Batjes, N. H. (2006). *ISRIS-WISE derived soil properties on a 5 by 5 arc minutes global grid*. World Soil Information. Wageningen: ISRIC.
- Bekker, M. G. (1956). *Theory of Land locomotion*. Ann Arbor: University of Michigan Press.

- Ben-Dor, E., & Banin, A. (1994). Visible and near-infrared (0-1,1 μ m) analysis of arid and semiarid soils. *Remote Sensing of Environment* , 48, pp. 261-274.
- Benoit, O. (2002). *Aptitude à la traficabilité des sols de surface remaniés aux engins chenillés : études expérimentales et modélisations phénoménologiques*. Thèse de doctorat, Grenoble.
- Benoit, O., & Gotteland, P. (2006). Etude des sols de surface : méthodologie pour une réponse opérationnelle sur leur traficabilité. *Revue française de géotechnique* (n°115), pp. 11-24.
- Benoit, O., & Gotteland, P. (2005). Maîtriser les risques de traficabilité des sols : une méthodologie pour une réponse opérationnelle. *Congrès AUGC*, (p. 8 p.). Grenoble.
- Benoit, O., & Gotteland, P. (2005). Modelling of sinkage tests intilled soils for mobility study. *Soil and Tillage research* , 80, pp. 215-231.
- Benoît, O., & Gotteland, P. (2002). DECART : dispositif expérimental de caractérisation de la traficabilité. *Symposium Int PARAM*, (pp. 251-258). Paris, France.
- Beucher, S., & Lantuéjoul, C. (1979). Use of watersheds in contour detection. *International workshop on image processing, real-time edge and motion detection*. Rennes.
- Beucher, S., & Meyer, F. (1993). The morphological approach to segmentation : the watershed transformation. *Mathematical Morphology in Image Processing* , pp. 433-481.
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physical-based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrology Science Bulletin* , 24, pp. 43-69.
- Birkel, P. (2003). *Terrain Trafficability in Modeling and Simulation*. SEDRIS technical Paper.
- Birot, P. (1973). *Géographie physique générale de la zone intertropicale*. CDU.
- Blaschke, T., Lang, S., Lorup, E., Strobl, J., & Zeil, P. (2007). Object-oriented Image Processing in an Integrated GIS/Remote Sensing Environment and Perspectives for Enrironmental Applications. *21st Conference in Informatics for Environmental protection*. Varsovie.
- Bloom, S., Da Silva, A., Bosilovich, M., Chern, J. D., Pawson, S., Schubert, S., et al. (2005). *Documentation and Validation of the Goddard Earth Observing System (GEOS) Data Assimilation System - Version 4*. Goddard Space Center. NASA.
- Blumberg, D. G. (2007). High resolution X-band SAR imagery for precise agriculture and crop monitoring. *ESA Workshop PolinSAR 2007*. Frascati.
- Boivin, T. G., Coates, D., & Werle, D. (2003). Remote Sensing application for information generation and monitoring for large rivier basin fisheries in tropical developing countries. *Proceedings of Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries*. Phnom Penh, Cambodia.
- Bonan, G. B. (1996). *A Land Surface Model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies : technical description and user's guide*. National Center for Atmospheric Research. Boulder: NCAR.

- Bonn, F., & Escadafal, R. (1996). La télédétection appliquée au sol. Dans B. F., *Précis de télédétection* (Vol. 2, pp. 92-136). Québec: PUQ/AUPELF.
- Boone, A., De Rosnay, P., Beljaars, A., Decharme, B., Delire, C., Ducharne, A., et al. (2006). *AMMA Land surface Model Intercomparison Project Experimental design*. CRNM. Toulouse: CRNM.
- Boser, B., Guyon, I., & Vapnik, V. (1992). A training Algorithm for Optimal Margin Classifiers. *5th Annual Workshop an Computational Learning Theory*, (pp. 144-152). Pittsburgh.
- Bothorel, A. (1983). *Télédétection des ressources terrestres : signature spectrales des roches et de minerais en zone aride*. Mémoire, Univ. P. et M. Curie, Sciences de la Terre, Paris.
- Bouchardeau, B., Callède, A., Pieyns, J., Roche, M., & Rodier, J. (1968). *Monographie hydrologique du Logone, 6e partie recueil de données numériques*. ORSTOM. N'Djaména: ORSTOM.
- Boulahouat, N., & Naert, B. (1996). Télédétection des ressources en sols en zone aride. *Etude et gestion des sols*, 3 (1), pp. 7-22.
- Boussaid, K. (2005). *Sols intermédiaires pour la modélisation physique : application aux fondations superficielles*. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, Ecole Doctorale mécanique, thermique et Génie Civile.
- Bouteyre, G. (1965). *Carte pédologique de reconnaissance au 1/200 000e : feuilles de Koumra, Moundou*. ORSTOM.
- Breune, I. (1997). *Le pénétromètre : un outil de travail de détermination de la qualité structurale des sols ?* Mémoire du M.Sc. de Laval.
- Brousseau, Y., & Le Turdu, V. (2005). Adhérence des revêtements de chaussées routières. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* (255), pp. 71-90.
- Brown, S. (1997). *Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forest : a Primer*. FAO, Forest resources. Urbana: FAO.
- Bruckler, L., Wittono, H., & Stengel, P. (1988). Near surface moisture estimation from microwave measurements. *Remote Sensing of Environment*, 26, pp. 101-121.
- Brunet-Moret, Y. (1966). *Complément à l'étude des averses exceptionnelles en Afrique occidentale, République du Tchad*. ORSTOM, Direction du Génie Rural. Ouagadougou
- Brunet-Moret, Y. (1967). *Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique occidentale. République de Haute-Volta*. ORSTOM. Paris
- Bryant, R., Reanrd, K. G., McElroy, S., Gburek, W., Canfield, W., Canfield, E., et al. (2003). Evaluation of Hyperspectral Infrared Temperature and Radar Measurements for Monitoring Surface Soil Moisture. *Proceedings First Interagency Conference on Research in the Watersheds, October 27-30*, (pp. 528-533). Benson, AZ.

- Bui, E. (2007). A review of digital Soil mapping in Australia. Dans P. Lagacherie, A. B. Mc Bratney, & M. Voltz, *Digital Soil Mapping, An Introductory Perspective*. Elsevier. pp. 25-39.
- Bukingham, W. F., & Sheldon, E. (1983). Mineralogical characterization of rock surfaces formed by hydrothermal alteration and weathering - application to remote sensing. *Economic Geology* , 78, pp. 664-674.
- Burrough, P. A., & McDonell, R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems - Spatial Information and Geostatistics*. Springer. 357 p.
- Bustamante, J., Pacios, F., Diaz-Delgado, R., & Aragonés, D. (2007, August 2). Predictive models of turbidity and water depth in the Doñana marshes using Landsat TM and ETM+ images. *Journal of Environmental Management* , pp. 1013-1021.
- Bustos, M., & Pollak, E. (1995). *Use of NATO Reference Mobility Model in a Real-Time Distributed Interactive Simulation Environment*.
- Calvet, J.-C., Chanzy, A., & Wigneron, J.-P. (1996). Surface Temperature and Soil Moisture Retrieval in the Sahel from Airborne Multifrequency Microwave Radiometry. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* , 34, pp. 588-600.
- Canny, J. (1986). A computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence* , 8, pp. 679-714.
- Caquot, A., & Kerisel, J. (1966). *Traité de mécanique des sols, 4e Ed.* (Vol. 1). Gauthier-Villars.
- Carrier, D. W. (2006). *Lunar soil simulation and trafficability parameters*. Lunar Geotechnical Institute, Lakeland.
- Cary, N. C. (2005, avril 11). *Engineous Software Wins Phase V award for Continuing Work on the US Army's Integrated Performance Cost Model Program*. Consulté le 11 05, 2007, sur engineous.com: http://www.engineous.com/release_101105_LMI.htm
- Cassan, M. (1978). *Les essais in situ en mécanique des sols* (Vol. 1). Paris: Eyrolles.
- CERVALD. (2009, 03 01). *Présentation du CERVALD*. (ESTIS, Producteur) Consulté le 06 05, 2009, sur REIC (Réseau d'échange d'Information Chimique): http://jp1.estis.net/sites/cien_td/default.asp?site=cien_td&page_id=1627768C-B3EF-4D05-AA34-2DB6936822ED
- Chanzy, A. (1993). Basic soil surface characteristics derived from active microwaves remote sensing. *Remote sensing reviews* , 7, pp. 303-319.
- Chasseigne, R. (2006). Etude des conditions de traficabilité au SW du Tchad et au Nord du Cameroun : constitution d'une base de données cohérentes et analyse du potentiel des capteurs satellites actuels. Mémoire d'Ingénieur de l'IGAL n°246. 132p.
- Chauhan, N. S., Miller, S., & Ardanuy, P. (2003). Spaceborne soil moisture estimation at high resolution : a microwave-optical /IR synergic approach. *Journal Remote Sensing* , 24 (2), pp. 4599-4622.

- Choset, W., Walker, S., Eiamsa-ard, K., & Burdick, J. J. (2000, Fév). Sensor-based exploration : incremental construction of the hierarchical generalized Voronoï graph. *International Journal of Robotic Research* , 19 (2), pp. 126-148.
- Chrisman, N. R. (1991). *The error component in spatial data*. Longman Scientific & Technical.
- Clark, R.N., Swayze, G.A., Wise, R., Livo, E., Hoefen, T., Kokaly, R., Sutley, S.J., (2007). USGS digital spectral library splib06a: U.S. Geological Survey, Digital Data Series 231.
- Collins, N., Theurich, G., De Luca, C., Suarez, M., Trayanov, A., Balai, V., et al. (2005). Design and implementation of components in the Earth System Modeling Framework. *Int. J. High Perf. Comput. Appl.* , 19, pp. 341-350.
- Cornell University. (1951). *Final Report on Soil Solidification Research*. Soil Sciences. New York: Ithaca.
- Corté, J.-F., Shaeffner, M., Morel, G., & Joubert, J.-P. (1992). Présentation du nouveau Guide technique Réalisation des remblais et couches de forme. *Bulletin de liaison des Laboratoire des Ponts et Chaussées* , 182, pp. 33-49.
- Courault, D. (1989). *Etude de la dégradation des états de surface du sol par télédétection*. Thèse, INA-PG, Grignon.
- Courault, D., Girard, M.-C., & Escadafal, R. (1988). Modélisation de la couleur des sols par télédétection. *4th International Colloquium on Spectral Signature of Objects in Remote Sensing* (pp. 357-362). Aussois: ESA.
- Coutermarsch, B., & Dwinal, B. (2003). *Remote determination of bridging/fording site*. Cold Regions Research and Engineering Laboratory report.
- Cova, T. J. (1999). GIS in Emergency Management . Dans L. P. al., *Geographical Information System - Management Issue and Applications* (Vol. 2).
- Cross, A. M., & Mason, D. C. (1988). Segmentation of remote sensed images by split-and-merge process. *International Journal of Remote Sensing* , 9 (8), pp. 1329-1345.
- Cui, F., Fan, W., Zhao, Z., Shi, J., & Peng, L. (2004). An integrated classification strategy of hyperspectral imaging spectrometer data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*.
- Cummins, C. L., Jones, R. A., Gates, B. Q., Gerhart, G. R., Shoemaker, C. M., & Gage, D. W. (2006). Application of an off-road mobility model to autonomous cross- country routing of unmanned ground vehicles. *Proceeding of SPIE, The International Society for Optical Engineering. 5th Unmanned systems technology*. Kissimmee, Florida.
- Curkendall, D., Hare, T., Anderson, R., Dobinson, E., & Plesea, L. (2006). Mars GIS Landing site Suitability Models. *Lunar and Planetary Science XXXVII* .
- Daget, J., & Iltis, A. (1965). *Poissons de côte d'Ivoire. Eaux douces et saumâtres*. Mémoires de l'Institut Français d'Afrique noire N74.

- Daniel, K. W., Tripathi, N. K., Honada, K., & Apist, N. (2004). Analysis of VNIR (400-1100 nm) spectral signatures for estimation of soil organic matter in tropical soils of Thailand. *International Journal of Remote Sensing* , 25, pp. 643-652.
- Daroussin, J., King, D., Le Bas, C., Vrscaj, B., Dobos, E., & Monanarella, L. (2007). The Soil Geographical Database of Eurasia at scale 1:1000000 : History and perspective in digital soil mapping. *Soil Science* , 31, pp. 55-67.
- De Jeu, R. (2003). *Retrieval of land surface parameters using passive microwave remote sensing*. PhD thesis, Faculty of Earth and Life Sciences, Vrije Universiteit, Amsterdam, Netherlands.
- De Monmouth, G. (1135). *Histoire des rois de Bretagne. Traduit par l. Mathey-Maille*. (B. Lettres, Éd.)
- De Roo, R. D., Ulaby, F. T., & Dobson, M. C. (1998). Using Microwave radar for Soil moisture inversion under soybean canopies. *IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium*, 1, pp. 94-96.
- de Rosnay, P. F., Baup, F., Coudrec, C., Le Dantec, V., Kergoat, L., Lavenu, F., et al. (2005). Soil moisture monitoring in the Gourma meso scale site : from local station network to remote sensing approaches. *AMMA 1st International conference*. Dakar.
- Definiens Imaging GmbH. (2002). *eCognition User Guide*. Munich, Germany: Definiens Imaging GmbH.
- Devineau, J. L. (1990). Propriétés spectrales de la végétation ; Images satellites et milieux terrestres en région arides et tropicales. *Colloques et Séminaires; Journées télédétection de Bondy, 14 au 17 Novembre 1988* (pp. 43-49). ORSTOM.
- Dobson, M. C., & Ulaby, F. T. (1986). Active microwave research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* , 24 (1), pp. 23-36.
- Donlon, J. J., & Forbus, K. D. (1999). Using a Geographic Information System for Qualitative Spatial Reasoning about Trafficability. Loch Awe, Scotland: *Proceedings of the Qualitative Reasoning Workshop*.
- D'Orgeval, T., Polcher, J., De Rosnay, P., & Ngo-Duc, T. (2005). Impact of the Sahel Drought on the Water Balance in LSMs. *1st AMMA International Conference*, 3, p. 433. Dakar.
- Douville, H. (2004). Relevance of soil moisture for seasonal atmospheric predictions : it is an initial value problem ? *Climate Dynamics* , 22, pp. 429-446.
- Dubreuil, V., Ronchail, J., et Arvor D. (2007). Potentialités des données TRMM pour la spatialisation des précipitations au Mato Grosso, Brésil. *XXe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, pp. 210-215
- Ducharne, A., Koster, R. D., Suarez, M. J., Stieglitz, M., & Kumar, P. (2000). A Catchment-based approach to modeling land surface processes in a GCM , part 2. *J. Geophys. Res.* , 105, pp. 2483-24838.
- Duchaufour, P. (2001). *Introduction à la science du sol*. Paris: DUNOD.

- Edlund, S. (2004). *Driveability analysis using Digital Terrain Model and Map Data*. Master thesis, Linköping Universitet.
- Eichrodt, A. W. (2003). *Development of a Spatial Trafficability Evaluation System*. Doctoral dissertation, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.
- Ekobena, F. E. (2008). *Stratégie de développement : le cas du pipeline Tchad-Cameroun*. UQAM, Poissant de recherche sur la gouvernance et l'aide au développement. Montréal: UQAM.
- Elachi, C., Roth, L. E., & Schaber, G. G. (1984). Spaceborne radar subsurface imaging in hyperarid regions. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* , 22, pp. 383-388.
- Elvidge, C. D., Sutton, P. C., Tuttle, B. T., Ghosh, T. & Baugh, K. E. (2009) Global Urban Mapping based on Nighttime Lights. In *Global Mapping of Human Settlement, Experiences, Datasets and Prospects* par Gamba P. et Herold M., Taylor & Francis Ed., 363p.
- Escadafal, R. (1993). Remote sensing of soil color : principles and applications. *Rem. Sens.Reviews* , 7, pp. 261-279.
- Escadafal, R. (1994). Soil spectral properties and their relationship with environmental parameters examples from arid regions. Dans J. Hill, & J. Mègier, *Imaging Spectrometry - a tool for reflection and digital processing of aerial photographs* (pp. 71-87). Dortrecht, Boston, London.
- Escadafal, R., & Bacha, S. (1995). Strategy for the dynamic study of desertification. *ISSS International Symposium*, (pp. 19-34). Ouagadougou.
- Escadafal, R., & Pouget, M. (1987). Cartographie des formations superficielles en zone aride (Tunisie Méridionale) avec Landsat TM. *Photo-Interprétation* , 4 (2), pp. 9-14.
- Escadafal, R., Girard, M.-C., & Courault, D. (1988). La couleur des sols : appréciation, mesure et relations avec les propriétés spectrales. *Agronomie* , 8 (2), pp. 147-154.
- Fabre, J. (1983). *Afrique de l'Ouest, Introduction géologique et termes stratigraphiques*. Paris: Pergamon.
- Faisal, H. A., & Normaniza, O. (2007). Soil-roots composite : correlation between shear strength and some plant properties. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* , 12 (D).
- FAO. (1971-1981). *The FAO-Unesco Soil Map of the World. Legend and 9 volumes*. Unesco. Paris: Unesco.
- FAO. (1998). *World reference Base for Soil Resources. N°84*. Rome: ISSS - ISRIC - FAO.
- FAO. (2006). *World Reference Base for Soil Resources. N°103*. Rome: IUSS - ISRIC - FAO.
- Fekete, B. M., Vörösmarty, C. J., & Grabs, W. (2006, 06 03). *UNH/ GRDC Composite Runoff Fields V1.0*. (GRDC) Consulté le 02 03, 2009, sur <http://www.grdc.sr.unh.edu/index.html>
- Feldman, K. (2000). Integral Tactical Decision Aids in ArcInfo 8. *ESRI User's Conference*.

- Fiala, K., & Herrera, R. (1988). Living and dead belowground biomass and its distribution in some savanna communities in Cuba. *Folia Geobotanica* , 23 (3), pp. 225-237.
- Fleming, S., Jordan, T., Madden, M., Usery, E. L., & Weich, R. (2008). GIQ applications for military operations in coastal zones. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* .
- Flohn, H. (1965). *Tropical circulation pattern*. Bonn: Bonn met. Abh.
- Fradkin, D., & Muchnik, I. (2006). Support Vector Machines for Classification. Dans J. Abello, & G. Carmode, *Discrete Methods in Epidemiology* (Vol. 70, pp. 13-20).
- Frankenstein, S., & Koenig, G. G. (2004). *Fast All-Season Soil STrength (FAAST)*. US Army Corps of Engineers, CRREL, Washington DC.
- Friedl, M. A., & Brodley, C. E. (1997). Decision tree classification of land cover from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment* , 61, pp. 399-409.
- Fritz, T., & Eineder, M. (2009). *TerraSAR-X Ground Segment Basic Product Specification Document*. DLR.
- Frost, V. S., Stiles, J. A., Shanmugan, K. S., & Holtzman, J. C. (1982). A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* , 4 (2), pp. 157-165.
- Fung, A. K., & Chen, K. S. (1992). Dependence of the surface backscattering coefficients on roughness, frequency and polarization states. *International Journal of Remote Sensing* , 13, pp. 1663-1680.
- Fung, A. K., Li, Z., & Chen, K. S. (1992, Mar.). Backscattering from a randomly rough dielectric surface. *IEEE Trans. Geos. Remote Sensing* , 30, pp. 356-392.
- Gamar, M. M. (2006). *Routes non revêtues au Tchad, construction et gestion*. Stage de formation du CIRT. République du Tchad, ministère des Infrastructures. 10 p.
- Gascoin, S., Ducharne, A., Ribstein, P., Carli, M., & Habets, F. (2008). Adaptation of a catchment-based land surface model to the hydrogeological setting of the Somme River basin (France). *EGU2008. 10*. EGU.
- Gates, D. H., Keegan, H. J., Schleter, J. C., & Weidner, V. R. (1965). Spectral properties of plants. *Applied Optics* , 4, pp. 11-20.
- Gaussen, H. (1952). L'indice xérothermique. *Bulletin de l'Association française de géographie* , pp. 10-16.
- Geng, H., Gwyn, Q. H., Brisco, B., Boivert, J., & Brown, R. J. (1996). Mapping of soil moisture from C-band radar images. *Canadian Journal of Remote Sensing* , 22 (1), pp. 117-126.
- Gerhart, G. R. (2004). The Bekker Model Analysis for small robotic vehicles. *SAE Transactions*, 113, pp. 317-324. New York.
- Gianinetto, M., Villa, P., & Lechi, G. (2006). Postflood damage evaluation using Landsat TM and ETM+ data integrated with DEM. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* , 44 (1).

- Gibbesch A. et Schäfer B. (2004). Advanced Modelling and Simulation methods of Planetary Rover Mobility on soft Terrain. Proceedings of the 8th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation ASTRA 2004' ESTEC, Noordwijk, The Netherlands. Nov 2-4. 8p.
- Girard, M.-C., & Girard, C. (1999). *Traitement des données de télédétection*. Dunod.
- Giroud, J.-P., & Bottero, A. (1972, nov-déc). Influence des propriétés physico-chimiques des argiles monominérales sur leur comportement mécanique. *Bulletin Liaison Labo. P. & Ch.* , 62, pp. 105-116.
- Gitelson, A. A. (2004). Wide Dynamic Range Vegetation Index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *Journal of Plant physiology* , 161 (2), pp. 165-173.
- Gold, C. (1998). A Simplified approach to forest Decision Support Systems. *12th Annual Symposium on Geographic Information Systems*. Toronto.
- Golvang-Bayo, G., & Taher, M. A. (2006). *Cahier d'Histoire, à la découverte du Tchad n°2*. Ndjamena: Revue Bimestrielle du centre de Al Mouna.
- Goncalves, M. L., Netto, M. L., Costa, J. A., & Zullo Junior, J. (2008). An unsupervised method of classifying remotely sensed images using Kohonen self-organizing maps and agglomerative hierarchical clustering methods. *International Journal of Remote Sensing* , 29 (11), pp. 3171-3207.
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2001). *Digital Image Processing*. Boston, MA: Addison-Wesley Longman Publishing.
- Goodman, J. W. (1976). Some fundamental properties of speckle. *J. Opt. Soc. Am.* , 66, 1145-1150.
- Goodman, J. W. (2007). *Speckle phenomena in Optics, Theory and Applications*. Roberts & Company.
- Gotteland, P., & Benoit, O. (2006). Sinkage tests for mobility study, modelling and experimental validation. *Journal of Terramechanics* , 43, pp. 451-467.
- Graff, L. H. (2003). *Digital Topographic Support System (DTSS). Terrain Analysis*. US Army Corps of Engineer Topographical Experimental Center.
- Groult, M. (2007). *Maîtrise de l'intégration des sources ouvertes dans un système d'information géographique sur la traficabilité au sud ouest du Tchad et au nord du Cameroun*, Rapport Master 2 TAPE, Université Paris Diderot, Septembre 2007, 66 p.
- Grandjean, G., Paillou, P., Dubois, P., Augut-Bernex, T., Baghdadi, N., & Achaché, J. (2001). Sub-surface structures detection by combining L-band polarimetric SAR and GPR data : example of the Pyla dune (France). *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* , 39 (6), pp. 1245-1257.
- Grandjean, G., Grima, M. And ECORS Team (2009). The ECORS System, a mobility decision making tool. ISTVS, Bremen, Germany
- Grindle, C., Lewis, M., Ginton, R., Giampapa, J., Owens, S., & Sycara, K. (2004). Automating Terrain Analysis : Algorithms for Intelligence Preparation of the Battlefield.

Proceedings of the Human Factors and ergonomics Society, 48th Annual Meeting, (pp. 533-537).

Gruhier, C., de Rosnay, P., Kerr, Y., Mougin, E., Ceschia, E., Calvet, J.-C., et al. (2008, May 28). Evaluation of AMSR-E soil moisture product based on ground measurements over temperate and semi-arid regions. *Géophys. Red. Lett.* , 35, pp. 10-29.

Gruhier, C., de Rosnay, P., Richaume, P., Kerr, Y., Rüdiger, C., Walker, J. P., et al. (2007). Large scale evaluation of AMSR soil moisture products based on ground soil moisture network measurements. 9. Vienna: EGU2007.

Gsell, J., & Sonet, J. (1959). *Carte géologique de reconnaissance des états d'Afrique équatoriale, feuille d'Adré*. Inst. Equat. Rech. Géol. Minières. Brazzaville: Inst. Equat. Rech. Géol. Minières.

Gualtieri, J. A., & Crompton, R. F. (1998). Support Vector Machine for hyperspectral remote sensing classification. *SPIE 27th AIPR Workshop : Advances in Computer Assisted Recognition*, (pp. 221-232). Washington DC.

Guiraud, R. (1985). Tectonique post-hercynienne en Afrique du Nord et de l'Ouest. Dans B. R., *Evolution géologique de l'Afrique* (pp. 185-224). CIFE.

Gumos, A. K. (2005). *Modelling the Cross-Country Trafficability with Geographical Information Systems*. D-level Thesis, Linköping Univ.

Hadoubane, D., Bonn, F., Royer, A., Sommer, S., & Mehl, W. (2002). Land degradation and erosion risk mapping by fusion of spectrally based information and digital geomorphometric attributes. *International Journal of Remote Sensing* , 18, pp. 3795-3820.

Haley, P., Jurkat, M., & Brady, P. (1979). *NATO Reference Mobility Model, Edition 1, User Guide. Technical Report n°12503* (Vol. 1 et 2). US Army.

Haneberg, W. C. (2006). *Geologic and Topographical Influences on Military and Intelligence Operations*. Consulté le mai 5, 2006, sur Espionageinfo: www.espionageinfo.com

He, L. M., Kong, F. S., & Shen, Z. Q. (2005). Multiclass SVM based land cover classification with multisource data. *Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 6, pp. 3541-3545.

He, T., Wang, J., Lin, Z., & Cheng, Y. (2008). Study on Spectral features of Soil Organic Matter. *International archive of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* , XXXVII (B7), pp. 261-268.

Hellweger, F., Miller, W., & Oshodi, K. S. (2007). Mapping turbidity in the Charles River, Boston, using a High-resolution Satellite. *Environmental Monitoring and Assessment* , 139 (1-3), pp. 311-320.

Henderson, F. M., & Lewis, A. J. (1998). *Principles and Applications of Imaging Radar* (Vol. 2). New York: John Wiley & Sons.

Hengl, T., Gruber, S., & Shrestha, D. P. (2001). *Improving the plausibility of DEMs*. Consulté le 11 01, 2007, sur Integrated Land and Water Information System (ILWIS): <http://www.itc.nl/personal/shrestha/DTA/>

- Her, Y., & Heatwole, C. (2007). Land use classification in Zambia using Quickbird and Landsat imagery. *ASABE annual International Meeting*. Minneapolis.
- Hess, L. L., Melack, J. M., Filoso, S., & Wang, Y. (1995). Delineation of Inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with SIR-C Synthetic Aperture Radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* , 33 (4), pp. 896-903.
- Hess, L. L., Melack, J. M., Novo, E., Barbarosa, C., & Gastil, M. (2003). Dual season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon Basin. *Remote sensing of the Environment* , 87, pp. 404-428.
- Hetherington, J. G. (2001). The application of the MMP concept in specifying off-road mobility for wheeled and tracked vehicles. *Journal of Terramechanics* , 32 (2), pp. 63-70.
- Hibbits, C. A., & Gillespie, A. (2005). *Desert Trafficability Workshop, January 21-23*.
- Holah, N. (2005). *Potential des nouveaux capteurs radar multi-polarisation et polarimétriques pour la caractérisation des états de surface en milieu agricole*. Thèse, Université d'Orléans, Orléans.
- Holah, N., Baghdadi, N., Zribi, M., Bruand, A., & King, C. (2005). Potential of ASAR/ENVISAT for the characterization of soil surface parameters over bare agricultural fields. *Remote Sensing of Environment* , 96 (1), pp. 78-86.
- Hood, F. (2002). The military Impact of Counter Mobility. *Mines, demolition and non lethal Conference & Exhibition*. Defence Science and Technology Laboratory.
- Hoodmoed, W. B., & Klaij, M. C. (1997). *Le travail du sol pour une agriculture durable*. Consulté le mars 15, 2007, sur Cours et formation FAO - Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'agriculture: <http://www.fao.org/docrep/w7304f/w7304f00.htm>
- Houser, P. R., Rodell, M., Gottschalk, J., Meng, C.-J., Jambor, U., Mitchell, K., et al. (2004). The Global Land Data Assimilation System (GLDAS). *Proceedings of the 2nd International CAHMDA workshop on : The terrestrial Water Cycle : modelling and data assimilation across catchment scales*. Princeton.
- Houssa, R., Pion, J.-C., & Yesou, H. (1996). Effects of granulometric and mineralogical composition on spectral reflectance of soils in a Sahélian area. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing* , 51 (6), pp. 284-298.
- Hu, X., Tao, C. V., & Prenzel, B. (2005). Automatic segmentation of high-resolution satellite imagery by integrating texture, intensity, and color features. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* , 71 (12), pp. 1399-1406.
- Huang, Q., & Dom, B. (1995). Quantitative methods of evaluating image segmentation. *International Conference on Image Processing*. Washington DC: IEEE.
- Huete, A. R., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Xiang, G., & Laerte, F. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment* , 83, pp. 195-213.
- Huete, A. R., Restrepo-Coupe, N., Ratana, P., Didan, K., Saleska, S. R., Ichii, K., et al. (2008). Multiple site tower flux and remote sensing comparisons of tropical forest dynamics. *Agric. & Forest Meteorology* , 10.

- Huete, A., Justice, C., & Liu, H. (1994). Development of vegetation and soil indexes for MODIS EOS. *Remote Sensing of Environment*, 49, pp. 224-234.
- Huete, A., Justice, C., & Van Leeuwen, W. (1999). *MODIS Vegetation Index (MOD13) version 3*. University of Arizona, Tucson.
- Huete, A., Liu, H. Q., Batchily, K., & Van Leeuwen, W. (1997). A Comparison of vegetation index over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59, pp. 440-451.
- Huffman, G. J., Adler, R. F., Bolvin, D. T., Gu, G., Nelkin, E. J., Bowman, K. P., et al. (2007). The TRMM Multi-satellite precipitation Analysis : Quasi-global multi-year, combined sensor precipitation estimates at fine scale. *J. Hydrometeor.*, 8 (1), pp. 38-55.
- Huffman, G. J., & Bolvin, D. T. (2009). *TRMM and Other Data Precipitation Data Set Documentation*. NASA GSFC, Laboratory of Atmospheres.
- Hunt, G., & Salisbury, J. W. (1971). Visible and near-infrared spectra of mineral and rocks : II Carbonates. *Modern Geology*, 2, pp. 23-30.
- Iftene, T., Mahi, H., & Isataben, H. (2003). Approche de classification par réseaux de Kohonen pour établir des cartes d'occupation du sol de la région D'Oran (Algérie). *Télédétection*, 3 (2-3-4), pp. 361-372.
- IHS Energy. (2008, 06 09). *CNPC beats out seven companies for Niger Agadem Block*. Consulté le 08 03, 2009, sur IHS news 2008: <http://energy.ihs.com/News/WW-News/news-2008/cnpc-beats-out-seven-companies-for-nigers-gadem-block.htm>
- Infoterra. (2008). Radiometric Calibration of TerraSAR-X Data. Infoterra GmbH. Friedrichshafen, Germany. 16 p.
- Inzana, J., Kusky, T., Higgs, G., & Tucker, R. (2003). Supervised classifications of Landsat TM band ratio images and Landsat TM band ratio image with radar for geological interpretations of central Madagascar. *Journal of African earth Sciences*, 37, pp. 59-72.
- Irish, R. (1998, 07 16). *Landsat 7 Science Data Users Handbook*. Consulté le 03 16, 2009, sur Landsat 7 Science Data Users Handbook: <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook.html>
- Jackson, T. J. (1993). Measuring surface soil moisture using passive microwave remote sensing. *Hydrological process*, 7, pp. 139-152.
- Jackson, T. J., Schmugge, J., & Engman, E. T. (1996). Remote sensing applications to hydrology : soil moisture. *Hydrological Process*, 41 (4), pp. 517-530.
- Jamagne, M., & Boulaine, J. (2004). Quelques données sur les activités du Service d'Etude des sols et de la carte pédologique de France. *Etude et gestion des sols*, 11 (3), pp. 353-370.
- Jamin, J.-Y., Gounel, C., & Bois, C. (2003). *Agriculture et développement rural des savanes d'Afrique Centrale*. N'Djaména: PRASAC.
- Jensen, J. R. (2005). *Introductory Digital Image Processing*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

- Jeong, S., Won, C. S., & Gray, R. M. (2003). Histogram-based image retrieval using Gauss mixture vector quantization. *International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* (pp. 677-680). IEEE.
- Ji, Q., & Haralick, R. M. (1999). Quantitative evaluation of edge detectors using the minimum kernel variance criterion. *International Conference on Image Processing*. Kobe: IEEE.
- Jordan, C. F. (1969). Derivation of Leaf Area Index from quality measurements of light on the forest floor. *Ecology*, 50, pp. 663-666.
- Kääb, A., Paul, F., Maisch, M., Hoelzle, M., & Haeberli, W. (2002). The new remote-sensing-derived Swiss glacier Inventory : II. First results. *Annals of Glaciology*, 34, pp. 362-366.
- Kagamata, N., Akamatsu, Y., Mori, M., Li, Y. Q., Hoshino, Y., & Hara, K. (2005). Comparison of pixel-based and object-based classifications of high resolution satellite data in urban fringe area. *Proceedings of the 26th Asian Conference on Remote Sensing*. Tokyo.
- Karantza, K., & Argialas, D. (2006). Improving edge detection and watershed segmentation with anisotropic diffusion and morphological levellings. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (24), pp. 5427-5434.
- Kaurivi, J. Z., Huete, A. R., & Didan, K. (2003). Multitemporal MODIS-EVI Relationships with precipitation and temperature at the Santa Rita Experimental Range. *USDA Forest Service Proceedings*, (pp. 121-124).
- Kermanov, I. I. (1970). Study of Soils from the spectral composition of reflected radiation. *Soviet Journ. Soils*, 2, pp. 226-238.
- Kermer, R. (2004, 11 01). *Lettre d'information de la Délégation de la Commission Européenne au Tchad*. Consulté le 06 08, 2009, sur deltd: http://ec.europa.eu/delegations/deltd/fr/item2_info_docs/Lettre3_a4x10p.pdf
- King, C. (1985). *Contribution de la télédétection à la connaissance des sols et des formations superficielles : l'évaluation de l'apport des données de simulation SPOT*. Thèse, INA-PG.
- Klang, D. (1998). Automatic Detection of Change. *ISPRS Symposium on GIS - Between Visions and Applications*, 1, pp. 293-298. Stuttgart.
- Kohonen, T. (1989). *Self Organization and associative memory*. Berlin: Springer Verlag.
- Kohonen, T. (1982). Self-Organized Formation of Topologically Correct Feature Maps. *Biological Cybernetics*, 46, pp. 59-69.
- Kokkila, M. (2001). A GIS-Based trafficability analysis as a tool aiding the planning and execution of wood harvesting. ECOWOOD Project, Finland. *Metsätaloudellinen Aikakauskirja*, pp. 640-643.
- Kokkila, M. (2002). Digital Elevation Models (DEM) in trafficability analysis. ECOWOOD Project. 16 p.

- Kongoli, C., Pellegrino, P., & Ferraro, R. (2007). The utilization of the AMSU high frequency measurements for improved coastal rain retrievals. *Geophys. Res. Lett.* , 34 (10), 10-29.
- Konstantinidis, K., & Andreadis, I. (2005). Performance and computational burden of histogram based color image retrieval techniques. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering* , 5 (2), pp. 141-147.
- Koster, R. D., Dirmeyer, P. A., Guo, Z., Bonan, G., Chan, E., Cox, P., et al. (2004, August). Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science* , 305 (5687), pp. 1138-1140.
- Koster, R., Suarez, M., Ducharne, A., Stieglitz, M., & Kumar, P. (2000). A catchment-based approach to modeling land surface processes in a GCM, part 1, Model structure. *J. Geophys. Res.* , 105, pp. 24809-24822.
- Krieger, G., Moreira, A., Fiedler, H., Hajnsek, I., Eineder, M., Zink, M., et al. (2005). *TanDEM-X : A satellite formation for High Resolution SAR Interferometry*. WeBlings: DLR.
- Krishnan, P., Alexander, J. D., J., B., & Hummel, J. W. (1980). Reflectance technique for predicting soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Am.* , 44, pp. 1282-1285.
- Kuan, D. T., Sawchuk, A. A., Strand, T. C., & Chavel, P. (1985). Adaptive noise smoothing filter for images with signal dependent noise. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* , 7 (2), pp. 165-177.
- Lacoste, C. (2004). *Extraction de réseaux linéiques à partir d'images satellites et aériennes par processus ponctuels marqués*. INRIA, Univ. Sophia Antipolis.
- Lahuec, J. (1991). Convergence Intertropicale : l'intensité de la convection de mars à mai 1991. *Bulletin Veille Climatique Satellitaire*, 37, pp. 26-43.
- Lang, M. W., Townsend, P., & Kasishke, E. (2006). Influence on incidence angle on the use of C-band SAR data for the detection of flooded forests. *American Geophysical Union Fall meeting 2006*.
- Lapedes, D. N. (2005). *McGraw-Hill Dictionary of Scientific and Technical terms*. New York, Montréal.
- Laptev, I. (1997). *Road Extraction based on Snakes and Sophisticated Line extraction*. MSc thesis, Royal Institute of Technology, Numerical Analysis and Computer Science, Stockholm.
- Latry, C. (2005). *Création d'un modèle d'occupation du sol pour l'analyse des espaces bâtis*. INP ENSAT - Sigma, Toulouse.
- Laugier, O., Fellah, K., Tholey, N., Meyer, C., & De Fraipont, P. (1997). High Temporal Detection and Monitoring of Flood Zone Dynamic using ERS Data around catastrophic natural events : the 1993 and 1994 Camargue flood events. *Proceedings of the Third ERS Symposium, ESA SP-414, 1*, pp. 559-564.
- LCPC-SETRA. (1992). *Réalisation des remblais et couches de forme*. LCPC-SETRA. Bagneux: SETRA.

- Le Hégarat-Masclé, S., Zribi, M., Alem, F., Weisse, A., & Loumagne, C. (2002). Soil moisture estimation from ERS/SAR data : towards an operational methodology. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* , 40 (12), pp. 2647-2658.
- Le Toan, T. (1982). Active microwave signatures of soils and crops. Significant results of three years of experiment. *IGARSS 82*, (pp. 31-35). Munich.
- Leblanc, M., & Leduc, C. (2006). Evidence for Megalake Chad, North-Central Africa, during the late Quaternary from satellite data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* , 230, pp. 230-242.
- Lee, J. S. (1980). Digital Image enhancement and noise filtering by use of local statistics. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* , 2 (2), pp. 165-168.
- Letournel, V., Sankur, B., Pradeilles, F., & Maître, H. (2002). Feature extraction for quality assessment of aerial Image segmentation. *International Society of Photogrammetry and Remote Sensing*. 3. Graz: ISPRS.
- L'Herminier, R. (1967). *Cours de mécanique des sols et des chaussées*. Société de diffusion de mécanique et des T.P.
- L'Hôte, Y. (1998). *Climatologie et agroclimatologie de la Province Extrême Nord (P.E.N) Cameroun*. ORSTOM. Montpellier: ORSTOM.
- Li, P., & Xiao, X. (2007). Multispectral image segmentation by a multichannel watershed-based approach. *International Journal of Remote Sensing* , 28 (19), pp. 4429-4452.
- Lilja, H., & Nevalainen, R. (2007). Developing a digital soil map for Finland. Dans P. Lagacherie, A. B. Mc Bratney, & M. Voltz, *Digital Soil Mapping A Introductory Perspective* (pp. 67-76). Elsevier.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2007). *Remote Sensing and Image Interpretation*. Madison: John Wiley & Sons.
- Lim, Y. S., Cho, T. I., & Park, K. H. (1990). Range Image segmentation based on 2D quadratic function approximation. *Pattern Recognition letters* , 11 (10), pp. 699-708.
- Lin, S. J. (2004). A vertically Lagrangian finite-volume dynamical core for global models. *Mon. Wea. Rev.* , 132, pp. 2293-2307.
- Lizarazo, I. (2008). SVM-based segmentation and classification on remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing* , 29 (24), pp. 7277-7283.
- Lloyd, S. (1982). Least square quantization in PCM. *IEEE Transactions on Information theory* , 28 (2), 129-137.
- Logistics Cluster Tchad. (2008, 04 01). *réglementation tchadienne en matière de circulation des véhicules*. Consulté le 06 08, 2009, sur logistics Cluster: www.logcluster.org/chad/road-transport/la...tchadienne-en.../reglementation-tchadienne-en-matiere-de-circulation-de-vehicules.0.doc
- Lopes, A., Nezry, E., Touzi, R., & Laur, H. (1990). Maximum A Posteriori speckle filtering and first order texture models in SAR images. *Proceedings of IGARSS '90*, 3, pp. 2409-2412. Washington DC.

- Lopes, A., Nezry, E., Touzi, R., & Laur, H. (1993). Structure Detection and Adaptive speckle filtering in SAR images. *International Journal of Remote Sensing* , 14 (9), pp. 1735-1758.
- Lopes, A., Touzi, R., & Nezry, E. (1990). Adaptive speckle filters and scene heterogeneity. *IEEE Transactions on geosciences and Remote Sensing* , 28 (6), pp. 992-1000.
- Lorette, A., Descombes, X., & Zerubia, J. (1998). *Extraction des zones urbaines fondée sur l'analyse de texture par modélisation markovienne*. INRIA. Sophia -Antipolis: INRIA.
- Louis, P. (1970). *Contribution géophysique à la connaissance géologique du bassin du lac Tchad*. Mém., ORSTOM.
- Maclaurin, E. B. (1997). The use of mobility numbers to predict the tractive performance of wheeled and tracked vehicles in soft cohesive soil. *Proceedings of the 7th European ISTVS Conference*, (pp. 391-398). Ferrara.
- Madeira-Netto, J. S. (1993). *Etude quantitative des relations constituants minéralogiques - Réflectance diffuse des latosols brésiliens. Application à l'utilisation pédologique des données satellitaires TM*. ORSTOM. Etudes et Thèses.
- Madeira-Netto, J. S. (1996). Spectral reflectance properties of soils. *Photo Interpretation* , 34, pp. 59-70.
- Magrin, G. (2001). *Le Sud du Tchad en mutation, des champs de coton aux sirènes de l'or noir*. Montpellier: CIRAD-PRASAC.
- Mahamat, K., Kolandi, M., & Boïmon, T. (2006). *Cahier d'Histoire, à la découverte du Tchad N°2*. Ndjamen: Revue bimestrielle du centre Al Mouna.
- Mahamat, K., Waayna, S. H., Kokoïmi, A. I., & Nelli, D. (2006). *Cahier d'Histoire, à la découverte du Tchad n°1*. Ndjamen: Revue bimestrielle du centre Al Mouna.
- Mahamat M. G. (2006). Routes non revêtues au Tchad, construction et gestion. Rapport de stage de formation à la CIRT. République du Tchad, Ministère des infrastructures. 10 p.
- Mahé, G. (1993). *Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes*. ORSTOM. Paris: ORSTOM.
- Mahé, G., & L'Hôte, Y. (1994). *Carte des pluies annuelles moyennes en Afrique de l'Ouest pour la période 1970-1989*. In "Les paysans du monde". Montpellier: Exposition permanente Agropolis Museum.
- Makasa, B. (1998). Utilisation and Improvment of lateritic gravels in road bases. *Ingéokring Newsletter* , p. 14.
- Makhamreh, Z. (2006). Evaluation of soil quality and devlopment stage using spectral reflectance of soils : case study in eastern mediterranean region. *International Conference of Soil and Desertification - Integrated Research for the Sustainable Management of Soils in Drylands*, (pp. 1-10). Hamburg.
- Manuwa, S. I. (2007). Some physical and Dynamic properties of Akure Clayloam Soils in Southwestern Nigeria. *Journal of Engineering and Applied Sciences* , 2 (2), pp. 407-411.

- Marot, T., Sarrazin, D., & Gayraud, G. (1997). *Résultats et leçons issus du projet SICLOP (Système d'Informations Climatologiques pour les Opérations et la Planification)* (Vol. n°38). Essais Industriels 2006.
- Martiniano de Oliveira Silveira, E., Tavares de Carvalho, L. M., Acerbi, F. W., & de Mello, J. M. (2008). The assessment of vegetation seasonal dynamics using multitemporal NDVI and EVI images derived from MODIS. *Red de Revistas Cientificas de America Latina y el Caribe, Espana y Portugal* , 14 (2), 177-184.
- Mason D., Speck R., Devereux B., Schumann G., Neal J. & Bates P. (2009) *Detection of flood extent in urban areas using High resolution TerraSAR-X data*. Conference Proceeding of EGU 2009, Vienna, Austria. Vol. 11.
- Massuel, S. (2001). *Modélisation hydrodynamique de la nappe phréatique quaternaire du bassin du lac Tchad*. Mémoire de DEA, Univ. Montpellier II, Sciences de l'eau, Avignon
- Matinfar, H. R., Sarmidian, F., Alavi, S. K., & Heck, R. J. (2007). Comparisons of Object-oriented and pixel-based classifications of Land use/Land cover types based on Landsat 7ETM+ Spectral bands. *American-Eurasian Journal of Agriculture & Environmental Sciences* , 2 (4), pp. 448-456.
- Markham, B. L., Boncyk, W. C., Helder, D. L. & Barker, J. L. (1997). Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper plus radiometric calibration. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 23, 4, pp. 318-332
- Meinel, G., Schumacher, U., & Hennersdorf, J. (2003). GIS technical evaluation of the flood disaster in summer 2002 with respect of Dresden on basis of remote sensing, laser scanner and measurments data. *ISPRS, Remote sensing Spatial Inf. Sc.* , 104-111 (34).
- Meisman, B. (2002). *Unsupervised Landcover Classification Using Quickbird Imagery*. Utah Unversity, GIS.
- Mendonça-Santos, M. L., & Dos Santos, H. G. (2007). The state-of-the-art of Brazilian soil mapping and prospects for digital soil mapping. Dans P. Lagacherie, A. B. Mac Bratney, & M. Voltz, *Digital Soil Mapping, an Introductory perspective* (pp. 39-55). Elsevier.
- Meyer, F. (1991). Un algorithme optimal pour la ligne de partage des eaux. *8e congrès de reconnaissance des formes en intelligence artificielle*, (pp. 847-857). Lyon.
- Michot, D., King, D., Nicoullaud, B., Dorigny, A., Bourennane, H., Cousin, I., et al. (2007). Apport des méthodes de géophysique à la connaissance de la variabilité spatiale et du fonctionnement hydrique des sols. Dans M. Guérif, & D. King, *Agriculture de précision* (276 p.). Paris: Quae.
- Mo, D. K., Lin, H., Li, J., Sun, H., & Xiong, Y.-J. (2007). Design and implementation of a high spatial resolution remote sensing image intelligent interpretation system. *Data science Journal* , 6, pp. 445-452.
- Moghaddam, M., Saatchi, S., & Cuenca, H. (2000). Estimating Subcanopy Soil Moisture with radar. *Journal Geophys. Res.* , 105 (11), pp. 14899-14911.
- Mohler, R. R., Helfert, M. R., & Giardino, J. R. (1989). The Decrease of Lake Chad as Documented during Twenty Years of Manned Space flight. *Geocarto International* , pp. 75-80.

- Molinier, M., Laaksonen, J., Ahola, J., & Häme, T. (2005). Self-Organizing Map Application for Retrieval of Man-made Structures in Remote Sensing Data. *ESA-EUSC 2005 Image Information Mining - Theory and Application to Earth Observation*, (pp. 1-16). Torrejon.
- Monnerat, L. (2000, Juin 11). *La révolution de l'internet tactique et la numérisation du champ de bataille sont en passe d'être opérationnels*. Consulté le 05 12, 2007, sur Checkpoint-online.ch: <http://www.checkpoint-online.ch>
- Monnerat, L. (2001, juin 15). *En testant sa première division digitalisée, l'US Army jette les bases concrètes du combat moderne*. Consulté le 12 08, 2007, sur Checkpoint-online.ch: <http://www.checkpoint-online.net>
- Moran, M. S., Peters-Lidard, C. D., Watts, J. M., & Mc Elroy, S. (2004). Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models. *The Canadian Journal of Remote Sensing* , 43, pp. 805-826.
- Mordelet, P. (1993). *Influence des arbres sur la strate herbacée d'une savane humide (Lamto, Côte d'Ivoire)*. Thèse, Université Paris VI, Paris.
- Moreira, A., Mittermayer, J., & Scheiber, R. (1996, Sept.). Extended chirp scaling algorithm for air-and spaceborn SAR dataprocessing in stripmap and ScanSAR mode. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* , 34 (5), pp. 1123-1136.
- Morovic, J., Shaw, J., & Sun, P. L. (2002). A fast non-iterative and exact histogram matching algorithm. *Pattern Recognition Letters* , 23 (1-3), pp. 127-135.
- Mougenot, B., & Cailleau, D. (1995). Identification par télédétection des sols dégradés d'un domaine sahélien au Niger. *ISSS International Symposium*, (pp. 169-179). Ouagadougou.
- Musy, A., & Soutter, M. (1991). *Physique du sol*. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires romandes.
- Nabil, A., Sarhan, E., & Darwish, A. (2007). Combining Edge Segmentation and Region Growing Segmentation for Multi-spectral High Resolution Remotely Sensed Imagery. *ENVISAT Symposium 2007*. Montreux.
- Nachtergaele, F., Van Velthuisen, H., & Verelst, L. (2008). *Harmonized World Soil Database version 1.0*. Rome: FAO-IIASA.
- Najman, L., & Schmitt, M. (1994). Watershed of a continuous function. *Signal Processing* , 38, pp. 99-112.
- Nanni, M. R., & Dematté, J. A. (2001). Quantification and discrimination of Soils developed from basalt as evaluated by terrestrial, airborne and Orbital sensors. *X Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, (pp. 1-9). Foz Do Iguaçu.
- Ndemo Bogonko, M. (2005). *Hyperspectral remote sensing of soil moisture gradients in the Millingerwaard, Netherlands*. Master dissertation for MSc in Physical Land Resources, Universiteit, Brussel, Belgium.
- Nezry, E. (1992). *Restauration de la réflectivité radar pour l'utilisation conjointe des images radar et optiques en télédétection*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.

- Nezry, E., Leysen, M., & De Grandi, G. (1995). Speckle and Scene Spatial Estimator for SAR Image filtering and texture analysis. *Proceeding of SPIE*, 2584, pp. 110-120.
- Niklas, K. J. (2005). Modelling Below- and Above-ground biomass for non-woody and woody plants. *Annals of Botany*, 95 (2), pp. 315-321.
- Njoku, F. (2009, 06 02). *Tchad : don de 47 millions de dollars pour le projet routier Koumra-Sarh*. Consulté le 06 08, 2009, sur afdb.org: www.afdb.org/fr/news-events/article/chad-us-47-million-adf-grant-for-koumra-sarh-road-4726
- Nogami, J. S., & Villibor, D. F. (1991). Use of lateritic fined-grained soils in road pavement base courses. *Geotechnical and Geological Engineering*, 9 (3-4), pp. 167-182.
- Nogami, Y., Jyo, Y., Yoshioka, M., & Omatu, S. (1997). Land use analysis of remote sensing by Kohonen nets. *IGARSS 97 A scientific Vision for Sustainable Development*, 3, pp. 1205-1207.
- Normaniza, N. S., & Barakbah, S. S. (2006). Parameters to predict slope stability - soil water and root profiles. *Ecological Engineering*, 28, pp. 90-95.
- North, H. C., Lilburne, L. R., Burgham, S. J., & Belliss, S. E. (2005). Segmentation of paddocks for object-level processing of multi-temporal satellite image sequences. *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australia and Southeast Asia*, (pp. 1-6). Otago.
- NSIDC. (2002, 06 15). *MODIS Spectral Bands*. Consulté le 03 02, 2009, sur National Snow and Ice Data Center: http://nsidc.org/data/docs/daac/modis_v5/spectral_bands.html
- Oh, Y., Sarabandi, K., & Ulaby, F. T. (1992). An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30 (2), pp. 370-381.
- Oh, Y., Sarabandi, K., & Ulaby, F. T. (2002). Semi-empirical model of the ensemble averaged differential Mueller matrix for microwave backscattering from bare soil surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40 (6), pp. 1348-1355.
- Oliver, C., & Quegan, S. (1998). *Understanding Synthetic Aperture Radar Images* (Vol. 1). ArtechHouse.
- Olivry, J.-C., Chouret, A., Vuillaume, G., Lemoalle, J., & Bricquet, J.-P. (1996). *Hydrologie du Lac Tchad*. ORSTOM.
- O'Loughlin, C. L. (1984). Effectiveness of introduced forest vegetation for protecting against landslides and erosion in New Zealand's steepplands. *Symposium on effects of forest land use on erosion and slope stability*. Honolulu.
- Ouerchefani, D., Taamallah, H., & Belghith, A. (2008). Apport de la classification spectrale des compositions colorées des indices pour la cartographie des sols salins dans un milieu aride du Sud tunisien. *Can. J. Remote Sensing*, 34 (5), pp. 438-446.
- Pacharnet, T. K., Pal, D. K., & Deshpande, S. B. (1996). Genesis and transformation of clay minerals in the formation of ferruginous inceptisols and vertisols in the Saptadhara watershed of Nagpur District, Maharashtra. *Journal of The Indian Society of Soil Science*, 44 (2), pp. 300-309.

- Parsons, D. (2004, 06 12). *One Semi Automated Forces Program Overview*. Consulté le 12 18, 2007, sur Sedris: <http://www.sedris.org/stc/2004/pp/onesaf/dp/sld001.htm>
- Patel, N., Scott, G., & Ellery, A. (2004). Application of Bekker Theory to wheeled, tracked and legged vehicles. *SPACE*. San Diego.
- Penaye, J., Kröner, A., Toteu, S. F., Van Schmus, W. R., & Doumnang, J.-C. (2006, April). Evolution of the Mayo Kebbi region as revealed by Zircon dating : an early (740 Ma) Pan-african magmatic arc in southwestern Chad. *Journal of African Earth Sciences* , 44 (4-5), pp. 530-542.
- Peteri, R., Celle, J., & Ranchin, T. (2003). Detection and extraction of road networks from high resolution satellite mages. *International Conference on Image Processing (ICIP'03)*, 1, pp. 301-304. Toulouse.
- Philipponnat, G., & Hubert, B. (2000). *Fondations et ouvrages en terre* (éd. 3e Edition). Paris: Eyrolles.
- Pias, J. (1970). *Carte pédologique du Tchad au 1/1000000. Notice explicative*. Ndjamen: ORSTOM.
- Pias, J. (1967). *Esquisse géologique des formations tertiaires et quaternaires du Tchad (au sud du 16e parallèle) à l'échelle de 1/1 000 000*. ORSTOM. Paris: ORSTOM.
- Pias, J. (1970). *La végétation du Tchad. Ses rapports avec les sols. Variations paléobotaniques au Quaternaire*. ORSTOM. N'Djamena: ORSTOM.
- Pias, J. (1962). *Les sols du moyen et bas Logone, du Bas Chari et des régions riveraines du lac Tchad et du Bahr El Ghazal* (Vol. 1). N'Djamena, Tchad: ORSTOM.
- Pias, J. (1967, mai 17). Quatre deltas successifs du Chari au Quaternaire (République du Tchad et du Cameroun). *C. R. Acad. Sc.* , 264, pp. 2357-2360.
- Pias, J. (1960). Sédimentation au Quaternaire dans l'Est de la cuvette tchadienne (Ouaddai, Ennedi). *Comptes Rendu hebdm. des scéances de l'Académie des sciences* , 250, pp. 1514-1516.
- Poccard, I., & Richard, Y. (1996). Sensibilité du NDVI aux variations pluviométriques en Afrique tropicale. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie* , 9, pp. 41-48.
- Polidori, L. (1997). *Cartographie radar*. Taylor & Francis.
- Pottier, E., & Lee, J.-S. (2009). *Polarimetric Radar Imaging, from basics to Applications*. (T. & Ed., Éd.) CRC Press.
- Pouclet, A., Vidal, M., Doumnang, J.-C., Vicat, J.-P., & Tchameni, R. (2006, April). Neoproterozoic crustal evolution in Southern Chad : Pan-African ocean basin closing, arc accretion and late- to post-orogenic granitic intrusion. *Journal of African Earth Sciences* , 44 (4-5), pp. 543-560.
- Pouget, M., Madeira, J., Le Floc'h, E., & Kamal, S. (1991). Caractéristiques spectrales des surfaces sableuses de la région cotière nord-ouest de l'Egypte : application aux données

satellites SPOT. *Caractérisation et suivi des milieux terrestres en régions arides et tropicales. 2e journée télédétection* (pp. 27-38). Bondy: Orstom.

Prudente, J. A. (2003). *Off Road Vehicle Suitability Analysis within the Kinsale National Forest, Central Luzon State University*. Philippines.

Puech, J.-P. (1989). *Géotechnique et projets autoroutiers. Rapport de travaux. Secteur autoroute*.

Ratana, P., Huete, A. R., & Didan, K. (2006). MODIS EVI based variability in Amazon phenology across the Rainforest Cerrado Ecotone. *IGARSS, July 31-August 4 2006* (pp. 1942-1944). IEEE.

Raunet, M. (2003). *Quelques clés morphopédologiques pour le Nord Cameroun à l'usage des agronomes*. CIRAD.

Reeves, M. C. (2006). *Quantifying Herbaceous Biomass in a Rangeland Ecosystem Using MODIS Land Products*. Consulté le 01 06, 2009, sur <http://www.ntsg.umt.edu/projects/rangeland/>

Rencz, A. N. (1999). *Remote Sensing for The Earth Sciences, Manual of Remote Sensing, Vol. 3*. John Wiley & Sons.

Reounodji, F. (2002). Dynamiques agricoles dans les savanes du Tchad : quelles perspectives cotonnières ? *Actes du Colloque 27-31 mai 2002 : Savanes africaines: des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis* (pp. 1-8). Garoua: PRASAC.

Ricard, J. F., Mc Mullen, J., & Poirier, P. (1995). *Les Terrains Aurifères, Case Study*. Consulté le 01 05, 2008, sur National Resources Canada: <http://www.nrcan.gc.ca/ms/canmet-mtb/mmsl-lmsm/mend/cases/lta/lta.htm>

Richards, J. A., & Jia, X. (2006). *Remote sensing Digital Image Analysis : An Introduction* (éd. 4e Ed.). Birkhäuser.

Richmond, P. A., Reid, S., Shoop, S. A., & Mason, G. (2004). *Terrain Surface Codes for an All-Season, Off-road Ride Motion Simulator*. Consulté le 10 01, 2007, sur MSIAC M&S Journal online: <http://www.msiac.dmsomiljournal/>

Richmond, P. W., Gates, B. Q., & Baylot, E. A. (2005). Modeling Vehicle-Terrain Interaction in Army Simulations. *SAE Commercial vehicle Engineering Conference, November 2005. Session : Off-Road Terrain Modeling*. Rosemont, IL, USA.

Riedlinger, T., Voigt, S., Kemper, T., & Mehl, H. (2000). Working towards an Improvement Monitoring Infrastructure to support Disaster Management, Humanitarian Relief and Civil Security. *ISPRS 31th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Global Monitoring for Sustainability and Security*. St Petersburg.

Rienecker, M. M., Suarez, M. J., Todling, R., Bacmeister, J., Takacs, L., Liu, H.-C., et al. (2008). *The GOES-5 Data Assimilation System - Documentation of Versions 5.0.1, 5.1.0 and 5.2.0*. NASA, GMAO. NASA.

Riser, J. (1999). *Géographie physique de l'Afrique occidentale et centrale*. Ellipse Universités.

- Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C.-J., et al. (2004). The Global Land Data Assimilation System. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* , 85 (3), pp. 381-394.
- Rognon, P. (1994). *Biographie d'un désert*. Paris. L'Harmattan.
- Rose, E., Clatworthy, J. C., & Nathanail, C. P. (2006). Specialist maps prepared by British military geologists for the D-Day landings and operations in Normandy. *Cartographic Journal* , 43 (2), pp. 117-143.
- Rosenqvist, A., Birkett, C. M., Bartholome, E., & De Grandi, G. (1999). Using satellite altimetry and historical gauge data for validation of the hydrological significance of the JERS-1 SAR (GRFM) mosaics in central Africa. *IGARSS'99*, 5, pp. 2754-2758.
- Rosenqvist, A., Forberg, B. R., Pimentel, T., & Richey, J. E. (1998). Using JERS-1 L band SAR to estimate methane emissions from the Jau river floodplain (Amazon/Brazil). *IGARSS'98*, 3, pp. 1623-1625.
- Rouse, J. W., Wiegand, C. L., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Third ERTS Symposium. SP-351I*, pp. 309-317. NASA.
- Rousselin, T., Guérin, K., Kourdian, R., Grandjean, G., Deheinzelin, H., Campagne, P. et al. (2008). Création d'un système d'information routière sur le Tchad Est : Apports et limites des données géospaciales. *Proceedings du Colloque SPACE APPLI 2008, Toulouse, 22-25 avril 2008*
- Rudant, J. P., De Hautecloque, H., & Pénicand, C. (1997). Potentiel des exploitations radar : exemple de la Guyane. *Bull. Soc. Géol. France* , 4, pp. 44-55.
- Saarilahti, M. (2002). *Soil interaction model. Project deliverable D2 of the Development of a Protocol for Ecoefficient Wood Harvesting on Sensitive Sites (ECOWOOD)*. EU 5th Framework Project (Quality of Life and Management of Living Resources).
- Saarilathi, M. (2003). *Soil Interaction Model - Appendix 4 - Evaluation of the WES-method in assessing the trafficability of terrain and the mobility of forest tractors*. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, Helsinki.
- Sabins, F. F. (1996). *Remote Sensing, Principles and Interpretation*. Freeman And Company.
- Saxton, K. E., Rawls, W. J., Romberger, J. S., & Papendick, R. I. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* , 50 (4), pp. 1031-1036.
- Scanvic, J.-Y. (1986). *Télédétection aérospatiale et informations géologiques*. (BRGM, Éd.) BRGM.
- Scarloff, S., Taycher, L., & La Cascia, M. (1997). Image digestion and Relevance Feedback in the Image World Wide Web Search Engine. *Visual* .
- Schaber, G. G., Mc Cauley, J. F., Breed, C. S., & Olhoeft, G. R. (1986). Shuttle imaging radar Physical controls on signal penetration and subsurface scattering in the Eastern Sahara. *IEEE Transactions on Geosciences an Remote Sensing* , 24, pp. 602-623.

- Schaber, G. G., McCauley, J. F., & Breed, C. S. (1997). The use of multifrequency and polarimetrics Sir-C/X-SAR data in geologic studies of Bir-Safsaf, Egypt. *IEEE Trans Geosciences Remote Sensing* , 59, pp. 33-36.
- Scheuchl B., Koudogbo F., Petrat L. & von Poncet F., (2009). *TerraSAR-X : Applications for Spaceborne High Resolution SAR data*. Anais XIV Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal, Brasil, p.7457-7464.
- Schneider, A., Friedl, M. A. & Potere, D. (2009). A New Map of Global Urban Extent from MODIS Remote Sensing Data Based on an Urban Ecoregion Approach. In *Global Mapping of Human Settlement, Experiences, Datasets and Prospects* par Gamba P. et Herold M., Taylor & Francis Ed., 363p.
- Scott Flynn, E., Dougherty, C. T., & Wendroth, O. (2008, 01 11). Assessment of Pasture Biomass with the Normalized Difference Vegetation Index from Active Ground-Based Sensors. *American Society of Agronomy* , 100, pp. 114-121.
- Sedant O. (2006). Étude des conditions de traficabilité au Sénégal oriental : analyse du potentiel des capteurs actuels, Mémoire Master 2 télédétection, Université Pierre et Marie Curie Paris VI, 120 p. Seignobos, C. (1988). Chronique d'une culture conquérante : le taro (Tchad méridional et Nord Cameroun). *Cahiers des sciences humaines* , 24 (2), 283-302.
- Sen, Z. (2008). *Wadi Hydrology*. New York: Taylor & Francis Group.
- Sertit. (2006). *Austria flooding, April 2006 Charter Space and Major Disaster. N°119. Report Sertit to Risk-EOS and ESA GMES Service Element*.
- Seto, K. C. (2009). Global Urban Issues : A primer. In *Global Mapping of Human Settlement, Experiences, Datasets and Prospects* par Gamba P. et Herold M., Taylor & Francis Ed., 363p.
- Shafri, H., & Ramle, F. (2009). A comparison of Support Vector Machine and Decision Tree Classification Using Satellite Data of Langkawi Island. *Information Technology Journal* , 8 (1), pp. 64-70.
- Shi, X. Z., Yu, D. S., Warner, E. D., Pan, X. Z., Petersen, G. W., Gong, Z. G., et al. (2006). Soil Database of 1:1 000 000 Digital Soil Survey and Reference System of the Chinese Genetic Soil Classification System. *Soil Survey Horizons* , 45, pp. 129-136.
- Shoop, S. A. (1993). *Terrain characterization for Trafficability*. CRREL report , US Army Corps of Engineer.
- Shoop, S. A., Affleck, R., Collins, C., Larsen, G. & Barna, L. (2005). Maneuver analysis methodology to predict vehicle impacts on training lands. *Journal of Terramechanics* , 42(3-4), pp. 281-303.
- Sighomnou, D. (2003). *Integrated flood Management Case Study. Cameroun : gestion intégrée des eaux de crues. Cas de la plaine d'inondation du fleuve Logone*. Global Water Partnership. WMO. Technical Support Unit, Yaounde.
- Silvertün, A., & Gumos, A. (2007). Analysis of Cross Country Trafficability, progress in data handling. *12th International Symposium on Spatial Data Handling* (pp. 921-941). Ed. Springer Berlin.

- Sivakumar, M., Konare, M., & Virmani, M. S. (1984). Agroclimatologie de l'Afrique de l'Ouest : le Niger. *Bulletin d'Information de l'ICRISAT* , 19, p. 294 p.
- Skempton, A. W. (1953). The colloidal Activity of Clay. *3rd International Conference of Soil Mechanics*, 1. Switzerland.
- Skempton, H. (1953). The post-glacial clays of the Thames estuary at Tilbury and Shellhaven. *Proceeding Congrès de Zurich*. Zurich.
- Slocum, K. R., Surdu, J. R., Sullivan, J., Rudak, M., Colvin, N., & Gates, C. (2003). Trafficability Analysis Engine. *Journal of Defense Software Engineering* .
- Smara, Y. (2005). Réduction du speckle dans les images SAR : concepts et algorithmes. *International conference : Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications* (pp. 1-12). Tunis: IEEE.
- Sonet, J. (1963). *Notice explicative sur la feuille de Niéré*. Brazzaville: Impr. Centrale d'Afrique.
- Soutter M., Mermoud A. et Musy A. (2007). Ingénierie des eaux et du sol. Processus et Aménagements. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. 294 p.
- Srivastava, H. S., Patel, P., Manchanda, M. L., & Adiga, S. (2003). Use of multi-incidence angle RADARSAT-1 SAR data to incorporate the effect of surface roughness in soil moisture estimation. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* , 41 (7), pp. 1638-1640.
- STAC, 2006. La méthode de l'indice de service. Inspection visuelle des chaussées aéronautiques. Direction Générale de l'Aviation Civile. Service Technique de l'Aviation Civile. Consulté le 12/03/2009 sur <http://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/chaussee/is.php>
- Stahl, C. (2005). *Accumulated Surfaces & Least-Cost Path : GIS Modeling for Autonomous Ground Vehicle (AGV) navigation*. MSc thesis Virginia Polytech Ins. Univ.
- Startsev, A. D., & Mc Nabb, D. H. (2001). Skidder Traffic Effects on Water Retention Pore-size Distribution an van Genuchten Parameters of Boreal Forest Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* , 65, pp. 224-231.
- Steinhaus, H. (1956). Sur la division des corps matériels en parties. *Bull. Acad. Polon. Sci.* , 4, 801-804.
- Stern, R. D., Dennett, D. M., & Garbutt, J. D. (1981). The start of the rains in West Africa. *J. Climate* , 1, pp. 59-68.
- Stoner, E. R., & Baumgardner, M. F. (1981). Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil Sci. Sic. Am. J.* , 45 (6), pp. 1161-1165.
- Suchel, J. (1988). *Les climats du Cameroun*. Thèse d'Etat, St Etienne.
- Sugita, M., Yasuoka, Y., Yamagata, Y., & Tamura, M. (1996). Scaling of NDVI and VSW index between Landsat TM and NOAA AVHRR data. *ACRS 1996*, (pp. 1-5). Tokyo.
- Sultan, M., Arvidson, R. E., & Sturchio, N. C. (1986). Mapping of serpentinites in the E. Desert of Egypt usong Landsat TM data. *Geology* , 14, pp. 995-999.

- Sun, X., Zhang, J., & Liu, Z. (2005). A comparison of object-oriented and pixel-based classification approaches using quickbird Imagery. *Proceeding of the International Symposium on Spatio-temporal Modeling, Spatial reasoning, Analysis, Data Mining and Data Fusion*. Beijing.
- Sundarapandian, S. M., & Swamy, P. S. (1996). Influence of herbaceous species composition on fine root biomass production in disturbed and undisturbed deciduous forest of Western Ghats. *Acat Oecologia* , 17 (2), pp. 163-176.
- Suvinen, A., Saarlahti, M., & Tokola, T. (2002). Terrain Mobility Model and Determination of Optimal Off-Road Route. *SCANGIS*, (pp. 251-259). Espoo, Finlande.
- Tabb, M., & Ahuja, N. (1997). Unsupervised multiscale image segmentation by integrated edge and region detection. *IEEE Transactions on Image Processing* , 6 (5), pp. 642-655.
- Taylor, C. M., Parker, R. J., Lloyd, C. R., & Thorncroft, R. R. (2005). Observations of synoptic-scale land surface variability and its coupling with the atmosphere. *Q. J. R. Meterol. Soc.* , 131, pp. 913-937.
- Tchadieu, G., Tsalefac, M., & Mbayi, R. (1999). Délimitation de la saison des pluies dans le Nord Cameroun. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie* , 12, pp. 151-158.
- Tengbeh, G. T. (1989). *The effect of grass cover on bank erosion*. PhD Thesis, Cranfield University, Silsoe Campus, Cranfield.
- Thompson, R. J., & Visser, A. T. (1999). Management of Unpaved Road Networks on Open cast Mines. *Transportation Research Board of the National Academies* , 652, pp. 217-224.
- Tian, J., & Chen, D.-M. (2007). Optimization in multi-scale segmentation of high-resolution satellite images for artificial feature recognition. *International Journal of Remote Sensing* , 28 (20), pp. 4625-4644.
- Tilho, J. (1948). *Notice sur les activités de la Commission scientifique du Logone et du Tchad*. FOM. ORSTOM.
- Toupet, T. (1992). *Le Sahel*. Paris. Nathan.
- Troch, P., Zhongbo, S., Colombo, P., & de Masi, F. (1997). Active Microwave Soil Moisture sensing under vegetation cover. *Proc. SPIE Remote Sensing of Vegetation and Sea* , 2959, pp. 84-93.
- Tucker, C. (2006). *History of the NDVI and vegetation Indices*. Consulté le 02 06, 2009, sur <http://www.docstoc.com/docs/2201282/History-of-the-NDVI-and-Vegetation-Indices>
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* , 8, pp. 127-150.
- Tuffery, S. (2007). *Data Mining et statistique décisionnelle*. Technip.
- U.S. Army Field Manual. (1990). *FM 5-33 : Terrain Analysis (renommé FM 3-34-330)*. Headquarters. Washington DC.
- U.S. Army Field Manual. (1991). *FM 34-130 : Intelligence Preparation of the Battlefield*. Headquarters, July 8.

U.S. Army Field Manual. (1994). *FM 5-430-00-1 - Planning and design of Roads, Airfields and heliports in the Theater of Operations - Road design (renommé FM 3-34461/462)*. Headquarters, Washington DC.

U.S Military Glossary Terms. (2006). *U.S Military Glossary Terms*. Consulté le avril 2006, sur <http://usmilitary.about.com/od/glossarytermst/g/t6456.htm>

Ulaby, F. T., Batlivala, P. P., & Dobson, M. C. (1978). Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture and soil texture. Part 1 : bare soils. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* , 16, pp. 286-295.

Ulaby, F. T., Moore, R. K., & Fung, A. K. (1986). *Microwave remote sensing*. Norwood: Artech House.

Ulaby, F. T., Moore, R. K., & Fung, A. K. (1982). *Microwave Remote Sensing active and passive, vol.2 : Radar remote sensing and surface scattering and emission theory*. New York: Adison - Wisley.

Underwood, J. R. (1998). *Military Geology in War and Peace*. Geological Society of America.

Van de Voorde, T., De Genst, W., Stephenne, N., Wolff, E., & Binard, M. (2003). Extraction of land use / Land cover -related information from Very High Resolution data in urban and subrurban areas. *23rd Symposium of the EARSeL*, (pp. 237-244). Rotterdam.

Van den Steen, I., Wolff, E., Debeir, O., Latinne, P., & Van Ham, P. (2001). Amélioration de l'interprétation numérique de l'occupation du sol. *23e Symposium canadien sur la télédétection*. Québec.

Vapnik, V. (1995). *The nature of Statistical Learning theory*. Springer Verlag.

Vega-Nieva D., Murphy P., Castonguay M., Ogilvie J. et ARP P.A. (2009). A modular terrain model for daily variations in machine-specific forest soil trafficability. *Canadian Journal of soil science*, 89 (1), pp. 93-109.

Verger, F. (1994). Un microrelief provoqué par l'alternance desiccation/humidification : les gilgaïs. *Sécheresse*, 5, pp. 211-217.

Vidal, M. (2004). Relations entre le substratum géologique et les paysages soudano-sahéliens ; exemple du partage des ressources dans la région du lac de Léré (sud-ouest du Tchad). *Conférence, 12 octobre 2004*. Montréal: UQAM.

Vila, D., Ferraro, R., & Joyce, R. (2007). Evaluation and improvment of AMSU precipitation retrievals. *J. Geophys. Res.* , 112.

Vincent, L., & Soille, P. (1994). Watersheds in digital spaces : an efficient algorithm based on immersion simulations. *IEEE Transactions on pattern Analysis and Machine Intelligence* , 13 (6), pp. 583-598.

Vong, T. T., Hass, G. A., & Henry, C. L. (1998). *NATO Referene Mobility Model (NRMM) Modeling of the DEMO III experimental Unmanned Ground Vehicle (XUV)*. Army Research Lab Aberdeen proving ground MD.

- Wacrenier, P. (1962). *Carte géologique de reconnaissance des états d'Afrique équatoriale, feuille Moundou*. Inst. Equat. Rech. Géol. Minières. Brazzaville: Inst. Equat. Rech. Géol. Minières.
- Wagner, W., & Pathe, C. (2004). Has SAR failed in Soil Moisture Retrieval ? *ENVISAT Conference*, (pp. 1-7). Salzburg.
- Wald, L. (1990). Monitoring the decrease of Lake Chad from space. *Geocarto International* , 3, pp. 31-36.
- Wallingford, H. R. (2006). *Flood Risk to People, Guidance Document*. Defra Environment Agency, Flood and Coastal Defence R&D Programme Phase 2. FD2321/TR2.
- Welcome, R. L. (1975). *L'écologie des pêches dans les plaines inondables africaines*. F.A.O. F.A.O.
- Wickland, B. E., & Wilson, G. W. (2005). Self-weight consolidation of mixtures of mine waste rocks and tailings. *Canadian Geotechnique* , 42 (2), pp. 327-339.
- Witkin, A. P. (1983). Scale-space filtering. *8th Int. Joint Conference Artificial Intelligence*, (pp. 1019-1022). Karlsruhe.
- Wittman, R. L., & Harrison, C. T. (2001). *OneSAF : a product line Approach to Simulation Development*. MITRE etchnical Papers.
- Wolff, J.-P., & Schneider, J. L. (1964). *Carte géologique de la République du Tchad*. BRGM. Orléans: BRGM.
- Wong, A. (1996). *What is Imaging Radar ?* (NASA) Consulté le 03 07, 2009, sur Jet Propulsion Laboratory - Imaging Radar: <http://southport.jpl.nasa.gov/>
- Wuest, B. A. (2008). Supervised region-based segmentation of Quickbird multispectral Imagery. *IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium* . Boston.
- Wuest, B., & Zhang, Y. (2008). Region based segmentation of Quickbird Imagery through fuzzy integration. *XXIst International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 7. Beijing.
- Wulder, M. A., Franklin, S. E., White, J. C., Cranny, M. M., & Dechka, J. A. (2004). Inclusion of topographical variables in an unsupervised classification of satellite imagery. *The Canadian Journal of Remote Sensing* , 30 (2), pp. 137-149.
- Xiao, X., Hagen, S., Zhang, Q., Keller, M., & Moore, B. (2006). Detecting leaf phenology on seasonally moist tropical forests in south America with multi-temporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment* , 103, pp. 465-473.
- Xu, W., Wu, B., Huang, J., Zhang, Y., & Tian, Y. (2004). A segmentation and classification approach of land cover mapping using Quickbird image. *IGARSS 04' Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 5, pp. 3368-3370. IEEE International.
- Yamagata, Y., Sugita, S., & Yasuoka, Y. (1997). Development of Vegetation-Soil-Water Index algorithms and applications. *Jour. Remote Sensing Society of Japan* , 17, pp. 54-64.

- Yang, X., Chapman, G. A., Young, M. A., & Gray, J. M. (2005). Using Compound Topographic Index to Delineate Soil Landscape facets from Digital Elevation models comprehensive coastal assessment. *MODSIM05*. Melbourne.
- Yesou, H., Clandillon, S., Allenbach, B., Bestault, C., De Fraipont, P., Inglada, J. (2003). A constellation of advantages with SPOTSWIR and VHR SPOT 5 data for flood extent mapping during September 2002 Gard event (France). *Proceeding of IGARSS'03*. Toulouse.
- Yesou, H., Meyer, C., Clandillon, S., & De Fraipont, P. (2001). Apport des données simulées SPOT5 pour la gestion du risque inondation. Actes du colloque "SPOT5 vers de nouvelles applications". *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection* , pp. 151-161.
- Yongcharlermchai, C. (1993). *Etude d'objets complexes sol/plante, à différents niveaux d'organisation : de la parcelle au paysage*. Thèse, INA-PG Grignon, Sols.
- Yoon, H., Yun, Y. B., & Park, J. H. (2003). Change vector analysis : detecting of areas associated with flood using Landsat TM. *Proceeding of IGARSS'03*. Toulouse.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Informations & Control* , 8, pp. 338-353.
- Zhang, C., Murai, S., & Baltsavias, E. (1999). Road network detection by mathematical morphology. *ISPRS Workshop "3D Geospatial Data Production Meeting"*, (pp. 185-200). Paris.
- Zhang, W. and Montgomery, D.R., (1994). Digital elevation model grid size, landscape representation and hydrologic simulations. *Water resources research*. Vol. 30. No.4. p. 1019-1028.
- Zhang, Y. J. (1996). A survey on evaluation methods for image segmentation. *Pattern Recognition* , 29 (8), 1335-1346.
- Ziemer, R. R., & Mahagan, W. F. (1991). *Erosion and sedimentation control on roads and construction sites in the federated states of Micronesia. Case Study*. Consulté le 01 10, 2008, sur U.S. Department of Agriculture, Forest service.: http://www.humboldt.edu/~rrz7001/pubs/ziemer_megahan.pdf
- Zribi, M., & Dechambre, M. (2002). An new empirical model to retrieve soil moisture and roughness from radar data. *Remote Sensing of Environment* , 84-1, pp. 42-52.
- Zutter, B. R., Mitchell, R. J., Glover, G. R., & Gjerstad, D. H. (1999). Root length and biomass in mixtures of broomsedge with Loblolly Pine or sweetgum. *Canadian journal of forest research* , 29 (7), pp. 926-933.